



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

KAVITAČNÍ EROZE

CAVITATION EROSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ LECNAR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL RUDOLF, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního
inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Lecnar

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Kavitační eroze

v anglickém jazyce:

Cavitation erosion

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při poklesu tlaku v proudící kapalině pod hodnotu tlaku nasycených par dochází ke vzniku kavitačních bublin, které při následném zvýšení tlaku implodují a dochází k mechanickému poškození obtékaného materiálu. Kavitační eroze se velmi obtížně výpočtově modeluje, většina výzkumu se soustřeďuje na experimentální pozorování hmotnostního úbytku a povrchového opotřebení.

Cíle bakalářské práce:

1. Provést rešerši mechanismů kavitačního opotřebení materiálů účinkem kavitace.
2. Experimentální studium kavitačního opotřebení na vzorku vybraného materiálu ve spolupráci s ÚMVI.

Seznam odborné literatury:

1. Noskvič a kol.: Kavítace v hydraulických strojích a zařízeních, SNTL Praha, 1989.
2. Brdička, M., Samek, L., Taraba, O.: Kavítace - Diagnostika a technické využití, SNTL, Praha 1981.
3. Terwisga, T.J.C., Fitzsimmons, P.A., Ziru, L., Foeth, E.J.: Cavitation erosion-a review of physical mechanisms and erosion risk models, Proceedings of CAV2009 conference, 2009.
4. Barinka, L.L., Hammitt, F.G.: Detailed investigation of cavitation pitting characteristics from cavitating Venturi tests, tech. report 8, 1963.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 20.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje kavitační erozi a je rozdělena do dvou hlavních částí. První část je věnována rešerši kavitační eroze se zaměřením na mechanismy kavitačního opotřebení. V první kapitole této rešerše je stručně popsán kavitační děj a jsou zde uvedeny různé typy kavitací. Hydrodynamická kavitace, která je klíčovým typem mé bakalářské práce, je popsána v následující kapitole. Závěrečná a zároveň nejrozsáhlejší kapitola se věnuje kavitačnímu opotřebení pevných těles, zejména účinkům mechanického působení kapaliny. Druhá část se zabývá experimentálním studiem kavitačního opotřebení vzorků. Cílem práce bylo zdokumentovat průběh experimentu, který byl proveden za účelem získání znalostí o úběru materiálu kavitační erozí.

KLÍČOVÁ SLOVA

kavitace, kavitační bubliny, kavitační eroze, mechanismy kavitačního opotřebení, kolaps kavitačních bublin, paprsek kapaliny

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on cavitation erosion and it is divided into two main parts. The first part is devoted to the search of cavitation erosion focusing on erosion mechanisms. In the first chapter of this search is briefly described cavitation process and different types of cavitation are listed here. Hydrodynamic cavitation which is the key type for this bachelor's thesis is described in the following chapter. The final and the most extensive chapter is devoted to cavitation erosion of solids which is largely associated with the effects of the mechanical action of the fluid. The second part is devoted to the experimental study of cavitation erosion of samples. The goal was to document the experiment which was carried out in order to gain knowledge about the material removal by cavitation erosion.

KEYWORDS

cavitation, cavitation bubbles, cavitation erosion, erosion mechanisms, collapse of cavitation bubbles, microjet

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LECNAR, L. *Kavitační eroze*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 44 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Rudolfa, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2013

.....
Lukáš Lecnar

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval panu doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. za jeho rady a odborné připomínky při vypracování této bakalářské práce a panu Ing. Martinu Hudcovi za poskytnutí materiálu z měření v laboratoři. V neposlední řadě patří velký dík mé rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.

Obsah

Úvod.....	9
1. Kavitace	10
1.1. Podstata kavitačního jevu.....	10
1.2. Typy kavitací.....	11
2. Hydrodynamická kavitace.....	13
3. Kavitační opotřebení	16
3.1. Mechanismy kavitačního opotřebení.....	17
3.1.1. Náráz divergentní kulové tlakové vlny	17
3.1.2. Náráz rychle se pohybujícího paprsku kapaliny	18
3.1.3. Hromadný kolaps	19
3.1.4. Kavituující víry	19
3.2. Namáhání povrchu tělesa	20
3.3. Elektrochemické procesy při kavitaci	21
3.4. Vliv materiálu.....	21
3.5. Intenzita kavitačního opotřebení	22
3.6. Úbytek hmotnosti materiálu	24
4. Experimentální studium kavitačního opotřebení	26
4.1. Hydraulické tratě	26
4.1.1. Trať č. 1.....	27
4.1.2. Trať č. 2.....	30
4.1. Průběh experimentu.....	32
4.1.1. Postup měření.....	33
4.1.2. Parametry jednotlivých vzorků a výsledky experimentu	34
4.2. Zhodnocení experimentu.....	37
Závěr	38
Použité informační zdroje	39
Seznam použitých zkratk a symbolů	41
Seznam obrázků, grafů a tabulek	43

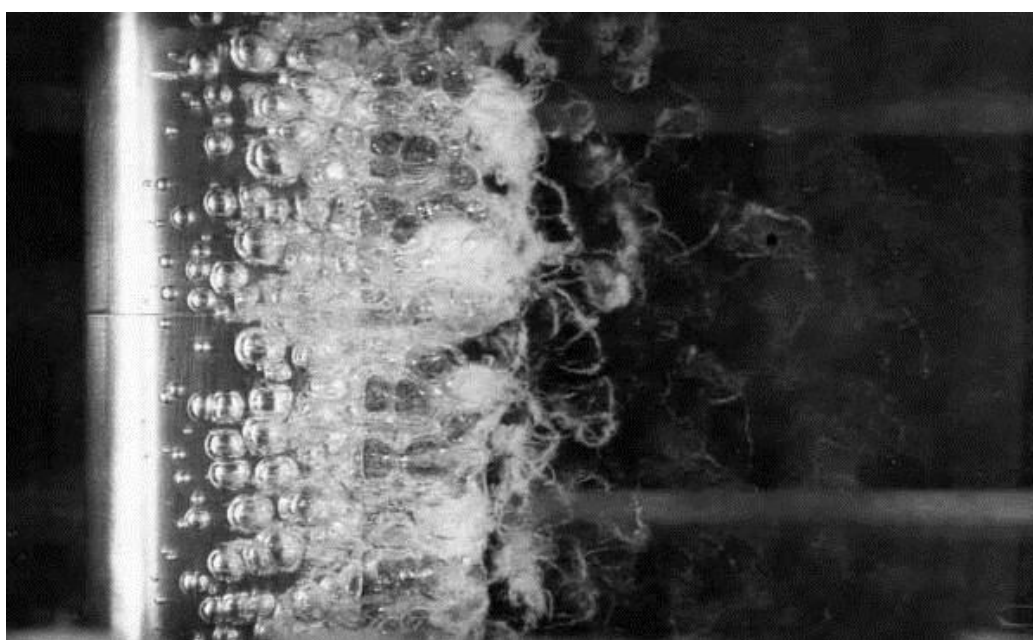
Úvod

S kavitačním jevem se setkáváme v dnešní době čím dál tím více, a to nejen v hydraulickém průmyslu. Až donedávna byla kavitace známa jako nežádoucí jev a byla noční můrou nejednoho konstruktéra hydraulických zařízení. Kavitace má značný vliv na provoz hydraulických zařízení jak z hlediska jejich životnosti, tak z hlediska bezpečnosti jejich provozu. To vedlo v minulosti konstruktéry k myšlence navrhovat zařízení tak, aby kavitace nemohla vůbec vzniknout. Důsledkem toho byla řada omezení při návrhu strojů a skutečnost, že stroje byly často neúčinné. Konstruktéři 21. století jsou již s kavitací smířeni a jejich návrhy hydraulických strojů připouští působení kavitace o určité intenzitě.

Současnost se naopak snaží využít těchto účinků ke kladným účelům. Existuje již řada odvětví lidské činnosti, ve kterých se kavitace využívá jako nástroj ke konání práce. Ať už je to v medicíně k odstraňování zubních a ledvinových kamenů, v kosmetice pro liposukci, v potravinářském průmyslu pro homogenizaci mléka, k hubení mikroorganismů ve vodě a v mnoha dalších. Kladné využití najdeme i ve strojírenském průmyslu, kde se kavitace využívá k technologickým účelům jako je čištění tvarově složitých součástí, odstraňování okují a dalších nečistot z povrchu výrobků.

1. Kavitate

Proces kavitace se vyskytuje ve velkém počtu případů relativního pohybu kapaliny nebo tělesa. Jedná se tedy například o průtok kapaliny potrubím či pohyb tělesa kapalinou, jako je například pohyb lopatek čerpadel a turbín [2]. Samotný kavitační jev byl popsán v roce 1895 S. W. Barnabym, který jej zdůvodňuje jako vznik parních bublin [1]. Ve skutečnosti však můžeme předpokládat, že vnitřní obsah bubliny je tvořen dříve zmiňovanou párou, ale i plynem, který se zpravidla považuje za dokonalý (ideální). Jak kapalná, tak plynná fáze (pára a plyn) se považují za spojitě kontinuum, jehož chování se řídí třemi zákony zachování. Jedná se o zákon zachování hmotnosti, zákon zachování hybnosti a zákon zachování energie. Dále také platí i stavové rovnice obou fází [2].



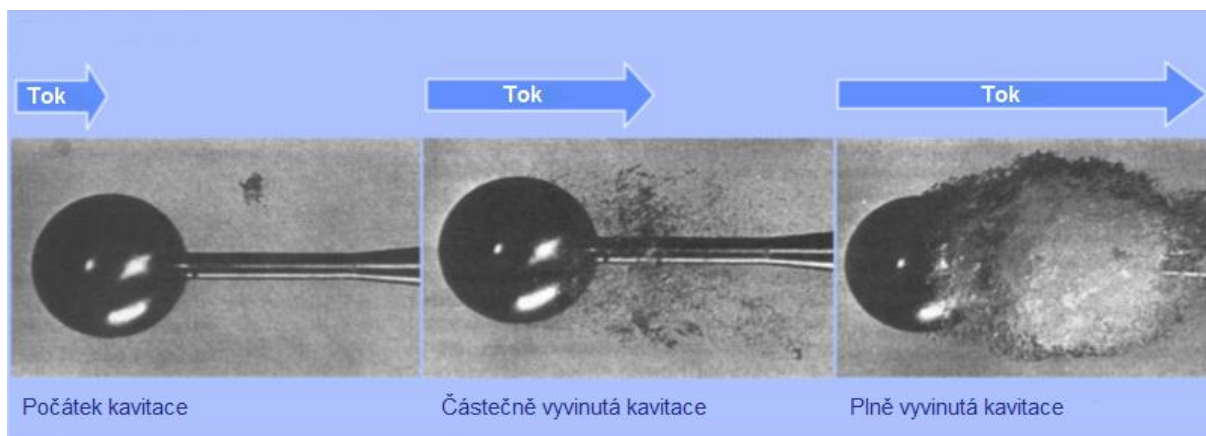
Obrázek 1: Kavitační děj [4]

1.1. Podstata kavitačního jevu

„Pojmem kavitace budeme rozumět množinu jevů sdružených s výskytem a působením dutin (bublin) v kapalině, tedy jak s celým jejich „životem“ včetně vzniku a zániku, tak s jejich fyzikálními, chemickými a biologickými účinky za předpokladu, že tyto děje nejsou vyvolány výrazným zvýšením teploty kapaliny. „Otcem“ slova kavitace je patrně Froude, který k jeho vytvoření použil latinského slova „cavitas“, což znamená dutinu.“ [2]

Při určitých rychlostních, resp. tlakových podmínkách se začnou objevovat ve spojitě kapalném prostředí nespojitosti, tj. bubliny [2]. Poklesne-li v daném místě tlak na hodnotu tzv. tlaku nasycených par, dojde při dané teplotě kapaliny k poruše souvislosti kapaliny a vzniku malé kavitační bubliny. V případě, že hodnota tlaku zůstane stejná nebo dojde k opětovnému snížení, velikost bubliny se postupně zvětšuje. V případě, že kavitační bublina vznikne v proudící kapalině, přemísťuje se do oblastí vyššího tlaku, nežli je tlak nasycených par, kde prudce kolabuje. Při kolapsu bubliny v blízkosti obtékané stěny nebo přímo na povrchu stěny dojde po určité době působení kavitace k porušení povrchu materiálu, které se

nazývá kavitační eroze [1]. Na Obrázek 2 je znázorněn postupný vývoj kavitace. Počátek kavitace je znázorněn na prvním obrázku zleva, částečně vyvinutá kavitace je zobrazena na prostředním obrázku a poslední obrázek nám znázorňuje plně vyvinutou kavitaci.



Obrázek 2: Obtékání koule kapalinou při rychlosti $c=6,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [6]

Existence kavitačního jevu v kapalině ovlivňuje její fyzikální vlastnosti. Hustota kapaliny je zřejmě závislá na počtu bublin obsažených v kapalině a rozhodně již nemůžeme považovat takovou kapalinu za homogenní či izotropní. Dochází však i k dalším změnám fyzikálních vlastností kapaliny, např. ke změně termodynamických vlastností díky prudkému vývinu tepla, který je zpravidla spojený se zánikem bubliny [2].

1.2. Typy kavitací

Jestliže kavitační oblast roste až do chvíle, kdy její uzavření je až za obtékaným tělesem, nazýváme tuto kavitaci *superkavitací* [1].

Byla-li kapalina ve stavu nasyceném, pak při snížení tlaku na určitou hodnotu se stává přesycenou plynem. Tento plyn se z kapaliny odpařuje a vstupuje do bubliny. Vzduch uvolněný z okolní kapaliny se dostane ke kulovému rozhraní bubliny pomocí difúze. Difúze je pomalá a proto i tento děj je pomalý. Tento proces vývoje bubliny se nazývá *plynová kavitace* [1].

„Jsou-li v kapalině obsaženy bubliny s velkým obsahem vzduchu, tj. s velkým počátečním poloměrem $r_{B0} > 0,001 \text{ mm}$, dochází při snižování tlaku k plynulému velkému zvětšování bubliny, aniž dojde k vypařování kapaliny. Tento jev byl nazván pseudokavitace.“ [1]

Dynamický pokles tlaku při obtékání profilů nebo při průtoku potrubím je nejčastější příčinou vzniku kavitace v hydraulických strojích. Jedná se o *kavitaci hydrodynamickou* a je podrobně popsána v následující kapitole [1].

Kavitace také vzniká v klidné, neproudící kapalině zavedením vysokofrekvenční tlakové vlny o velké amplitudě. Tlakové vlny jsou vyvolány kmitáním pevného tělesa ponořeného v kapalině. Tyto akustické tlakové vlny způsobí rozkmitání kapaliny a důsledkem změny jejich amplitudy vznikají a zanikají kavitační bubliny. Takto záměrně vybuzená kavitace se označuje jako *akustická* a má velké uplatnění při laboratorním vyšetřování odolnosti materiálu vůči kavitačnímu opotřebení [1].

Kavitace v klidné kapalině může také vzniknout kmitáním povrchů pevných stěn, které vyvolají tlakovou vlnu. Vzdalování povrchu od kapaliny může snížit tlak v kapalině až na hodnotu tlaku nasycených par a tím zapříčinit vznik kavitačních bublin. Velikost snížení tlaku závisí na zrychlení povrchu. Při vratném pohybu povrchu kavitační bubliny zanikají. Tento typ kavitace vzniká např. u spalovacích motorů obtékaných chladící vodou. Vnější povrchy válcových vložek se rozkmitají působením vnitřního pracovního procesu spalovacího motoru a způsobí vznik kavitace. Tato kavitace se označuje jako *vibrační* [1].

2. Hydrodynamická kavitace

Vznik hydrodynamické kavitace při obtékání profilů těles nebo protékáním částmi stroje je podmíněn dynamickým poklesem tlaku až na hodnotu tlaku nasycených par, při němž se začínají objevovat kavitační bubliny [1].



Obrázek 3: Hydrodynamická kavitace [7]

V případě stacionárního proudu je velikost tlaku závislá na rozložení rychlosti. Při aplikaci Bernoulliho rovnice pro dokonalou kapalinu například pro průtok Venturiho dýzou zjistíme, že největší rychlost se nachází v nejužším místě dýzy, kde se vyskytuje i největší tlak rovný [1]:

$$p_2 = p_1 - \rho \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}, \quad (2.1)$$

kde:

c_1 je rychlost proudu vstupujícího do kanálu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

c_2 je rychlost v nejužším místě kanálu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

ρ je hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

p_1 je tlak ve vstupu do kanálu [Pa],

p_2 je tlak v nejužším místě kanálu [Pa].

Kavitace zde vzniká při snížení tlaku p_2 pod hodnotu tlaku nasycených par p_{kav} . Pro vznik kavitace tedy platí podmínka [1]:

$$p_2 \leq p_{kav}. \quad (2.2)$$

Pro nestacionární proudění je lokální tlak v proudu proměnný s časem. Tuto proměnnost způsobuje lokální zrychlení proudu. Místní tlak je tedy určen vztahem [1]:

$$p'_2 = p_2 - \rho x \frac{dc}{dt}, \quad (2.3)$$

kde:

x je délka zrychlovaného sloupce kapaliny [m],

p_2 je tlak proudu [Pa],

$\frac{dc}{dt}$ je zrychlení proudu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Při nestacionárním proudění je kavitace podmíněna vztahem [1]:

$$p'_2 \leq p_{kav} < p_2, \quad (2.4)$$

tedy při:

$$p_2 > p_{kav}. \quad (2.5)$$

K hydrodynamické kavitaci patří také kavitace *vírová*, která vzniká v jádře víru nacházejícího se v kapalině. Vzniká důsledkem hydrodynamického snížení tlaku v porovnání s obklopující kapalinou. Vzniká za obtékanými profily, tělesy a nerovnostmi (výstupky) za podmínky [1]:

$$p_{kav} > p_{vír} = p_k - \rho \frac{c_{vír}^2}{2}, \quad (2.6)$$

kde:

$c_{vír}$ je rychlost v jádře víru na poloměru $r_{vír}$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] a platí $c_{vír} = r c_r / r_{vír}$,

c_r je rychlost na okraji víru na poloměru r [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

p_k je tlak v okolní kapalině [Pa].



Obrázek 4: Vírová kavitace [8]

Při obtékání výstupků či nerovností na povrchu proudem kapaliny vzniká při určitém Reynoldsově čísle za výstupkem vír, který se při dalším zvětšení Reynoldsova čísla odtrhne

od výstupku a odpluje. Počet vznikajících vírů za čas je vyjádřen Strouhalovým číslem, které je dáno vztahem [1]:

$$S_r = \frac{fh}{c_v}, \quad (2.7)$$

kde:

f je frekvence vzniku vírů [s^{-1}],
 h je výška výstupku [m],
 c_v je rychlost volného proudu [$m \cdot s^{-1}$].

Hodnota Strouhalova čísla je přibližně $S_r = 0,2$. Například pro $c_v = 20 m \cdot s^{-1}$, $h = 0,002 m$ je počet vznikajících vírů $f = 10^3 s^{-1}$ [1].

Za každým oboustranně obtékaným tělesem se vytváří řada vírů nazývané Karmánovy víry. Při obtékání válce se vyskytují tyto víry v rozsahu Reynoldsových čísel $30 < Re < 2 \cdot 10^5$. Reynoldsovo číslo je dáno rovnicí [1]:

$$Re = \frac{cd}{\nu}, \quad (2.8)$$

kde:

d je průměr válce [m],
 c je rychlost proudu [$m \cdot s^{-1}$],
 ν je kinematická viskozita [$m^2 \cdot s^{-1}$].



Obrázek 5: Karmánovy víry [9]

„Frekvence vzniku vírů je určena také Strouhalovým číslem $S_r = fd/c$, jehož hodnota se pohybuje v rozsahu $0,14 < S_r < 0,19$ nebo se určí ze vztahu $S_r = 0,21(1 - 20/Re)$. Periodičnost vzniku kavitačních oblastí za válcem je stejná jako při obtékání bezkavitačním. Kavitate v difuzoru vzniklá odtržením proudu má také periodický charakter, přičemž Strouhalovo číslo podle typu difuzoru je v rozsahu $0,31 < S_r < 0,58$ a je definováno vztahem [1]:

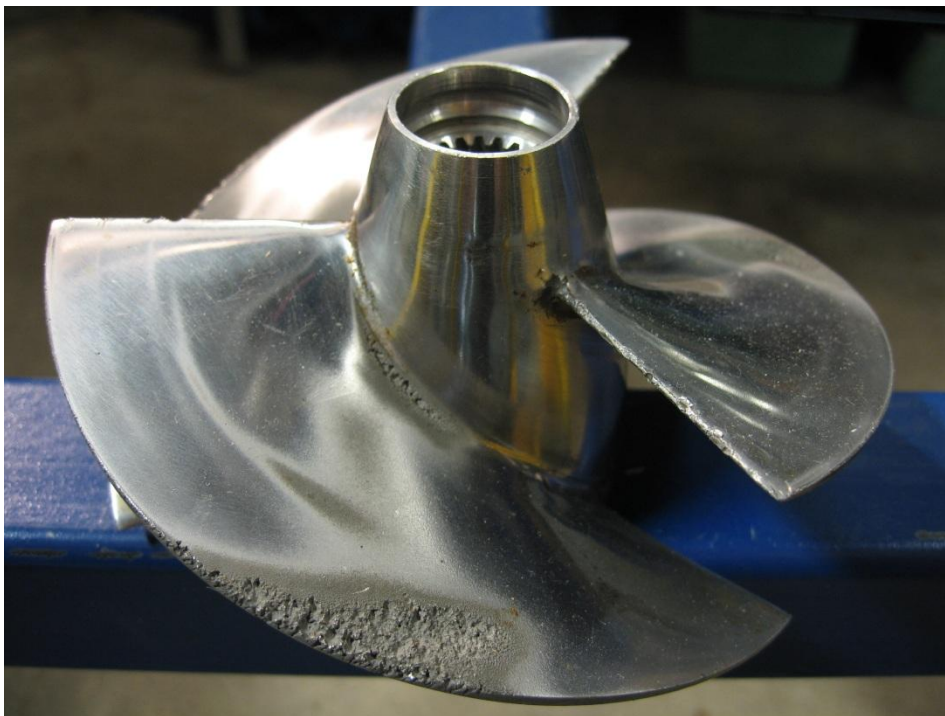
$$S_r = \frac{fl_K}{c}, \quad (2.9)$$

kde:

l_K je délka kavitační oblasti [m].“

3. Kavitační opotřebení

Jedním z důsledků kavitačního jevu je *opotřebení povrchů pevných těles* přítomných v kapalině. Tento zpravidla nežádoucí jev má vliv na provoz příslušných zařízení a z hlediska jejich životnosti je velmi nebezpečný. Nepříznivě ovlivňuje některé charakteristiky zařízení v provozu a omezuje možnosti konstrukce hydraulických zařízení. Kavitační opotřebení se musí vzít v úvahu nejen u lodních šroubů, vodních turbín či čerpadel, kde může vniknout kavitační opotřebení i jen při provozu za nevhodných podmínek, ale i u armatur, potrubí a různých uzavíracích, regulačních a měřících zařízení a podobně [2].



Obrázek 6: Kavitační eroze lodního šroubu [5]

Kavitační rozrušení o různých velikostech a tvarech se vyskytuje u lodních šroubů na různých místech povrchu. Může se projevit jen úzkou brázdou nebo v horším případě relativně rozsáhlou oblastí lodního šroubu. Tak intenzivní dopad (nejen u lodního šroubu) donutil konstruktéry navrhovat hydraulická zařízení tak, aby kavitace vůbec nevznikala. To ovšem vedlo k řadě omezení možností, jak nejefektivněji zkonstruovat příslušné zařízení. Např. k omezení možností efektivně využít vlastností konstrukčních materiálů apod. Proto se při návrhu hydraulického zařízení občas připouští působení kavitace o dovolené intenzitě, která je dodnes předmětem především ekonomických úvah [2].

Kavitace má však i světlou stránku a může být i užitečná. V některých aplikacích se využívá k technologickým účelům, jako je např. využití akustické kavitace k čištění povrchů tvarově složitých součástí, odstraňování okují či jiných nečistot z povrchů výrobků v hutnickém provozu, vytváření emulzí, suspenzí, roztoků atd., kde je naopak snaha, aby intenzita kavitace byla co největší. Nejčastěji používanou kapalinou k technologickým účelům je voda, a to především proto, že voda je nejdostupnější ze všech kapalin. Kavitace však vzniká i v ostatních kapalinách a rozrušení povrchů se týká prakticky všech druhů materiálů:

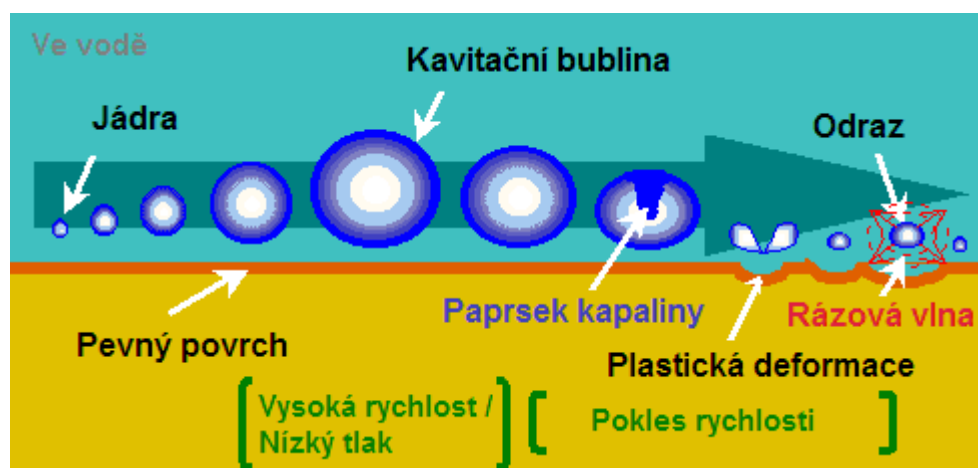
pružných, křehkých, tvrdých, houževnatých, chemicky inertních či aktivních, skla, pryže, cementu, plastických hmot a jiných nekovových pevných látek [2].

3.1. Mechanismy kavitačního opotřebení

„V prvních teoriích o mechanismu rozrušení povrchů pevných těles při kavitaci se předpokládalo, že opotřebení povrchů je způsobeno otěrem vyvolaným kapalinou rychle proudící podél povrchu. Je to do určité míry správná představa, neboť ideální kapalina, která vůbec neobsahuje mechanické částice, neexistuje. Drobné mechanické částice v kapalině způsobují při jejím proudění podél povrchu tělesa určité opotřebení povrchu.“ [2]

Eroze je díky koncentraci mechanické energie na velmi malou oblast stěny pevného tělesa vystavena kavitaci, která je doprovázena kolapsem parních struktur. Důsledkem této koncentrace energie je vysoká míra napětí, která může překročit dovolené meze materiálu, jako je mez kluzu, mez pevnosti či mez únavy. Odezva materiálu na toto kavitační „bombardování“ nesčetných kolapsů parních struktur je z hlediska mechaniky kontinua, mechaniky tuhých těles a metalurgie klíčovým bodem kavitační eroze [3].

Teorie přisuzující největší podíl kavitačního rozrušení čistě mechanickému působení kapaliny na povrch tělesa nejsou zcela jednotné v definici mechanismu tohoto působení. Existují totiž dva různé druhy mechanického působení kapaliny. První mechanické působení je popsáno jako *náraz divergentní kulové tlakové vlny* vybuzené kolabující bublinou, která si po celou dobu svého kolapsu zachovává svůj kulový tvar. Druhé mechanické působení se vyjadřuje jako *náraz rychle se pohybujícího paprsku kapaliny* na pevnou stěnu, který vznikl při nesymetrickém kolapsu kavitační bubliny. Rozhraní mezi zmenšující se bublinou a kapalinou je velmi nestabilní a proto i nepatrná porucha původně kulového tvaru může způsobit vznik paprsku kapaliny [2]. „U bublin kolabujících na povrchu pevného tělesa nebo v jeho blízkosti či v kapalině s lokálními tlakovými gradienty je větší pravděpodobnost vzniku paprsku než u bublin kolabujících „uvnitř“ kapaliny bez tlakových gradientů.“ [2]



Obrázek 7: Mechanismy kavitačního opotřebení [10]

3.1.1. Náraz divergentní kulové tlakové vlny

Nesčetně studií prokázalo, že závěr kolapsu sféricky symetrické bubliny je provázen vysokými hodnotami teploty a tlaku uvnitř bubliny [3]. Kavitační bublina kolabuje v blízkosti povrchu tělesa a příčinou rozrušení povrchu je tlaková vlna o vysoké intenzitě vyvolaná právě

kolabující bublinou [2]. Doba trvání tlakové vlny v okolí středu bubliny je řádově jedna mikrosekunda a amplituda vlny se snižuje prostorově v závislosti na poloměru bubliny, přibližně s $1/r$. Fujikawa a Akamatsu naměřili hodnotu tlaku řádově 100 MPa v okamžiku nárazu tlakové vlny na citlivý povrch snímače [3].

3.1.2. Náraz rychle se pohybujícího paprsku kapaliny

Kornfeld a Suvarov byli jedni z prvních, co zpozorovali, že kolaps bubliny může mít nesymetrický tvar, kdy povrch bubliny je jakoby promáčknut okolní kapalinou proudící velkou rychlostí tenkým paprskem dovnitř bubliny [2]. Tento proces můžeme vidět na Obrázek 8. Pokud je bublina v dostatečné blízkosti stěny pevného tělesa, paprsek kapaliny je směřován přímo na stěnu. Aktuální odhad rychlosti paprsku kapaliny V_j těsně před dopadem na zeď je řádově $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zvýšení tlaku následkem dopadu paprsku na zeď lze odhadnout pomocí Zukovského a Allieviho vzorce [3]:

$$\Delta p = \rho a V_j, \quad (3.1)$$

kde:

a je rychlost zvuku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].



Obrázek 8: Paprsek kapaliny (microjet) [11]

Pro vodu běžně získáváme hodnotu $\Delta p = 150 \text{ MPa}$, tedy v řádově stejném rozsahu jako při tlakové vlně v prvním mechanismu. Doba trvání tlakového pulzu je v závislosti na průměru paprsku d_p určena vztahem [3]:

$$t = \frac{d_p}{2a}. \quad (3.2)$$

Pro bublinu o počátečním průměru 1 mm má paprsek kapaliny průměr okolo 0,1 mm, takže doba trvání tlakového pulzu je velmi krátká, tj. přibližně $0,03 \mu\text{s}$ [3].

Můžeme tedy říci, že oba hydrodynamické mechanismy, tj. náraz divergentní kulové tlakové vlny a náraz rychle se pohybujícího paprsku kapaliny způsobují vysokotlaké pulsy o řádově stejné hodnotě, jako je mez kluzu běžných kovů. Pozornost je také třeba věnovat době trvání pulsů. Přenos energie z kapalného stavu do pevného vyžaduje jen minimální dobu trvání, takže oba mechanismy předávají energii velmi dobře. Délka trvání se však zvětšuje s velikostí bubliny [3].

3.1.3. Hromadný kolaps

Účinky hromadného kolapsu se vyskytují při kolapsu mračna bublin. Ve vibračních zařízeních, například ve kterých rychle osciluje malý vzorek v kapalině, se vytváří mnoho bublin, které kolabují blízko vzorku [3].

Hromadný kolaps můžeme také pozorovat při kolapsu jediné bubliny v blízkosti pevné stěny. Paprsky kapaliny, které prorazí bubliny, vedou k tvorbě parních prstenců. Tyto prstence se často rozdělují na několik malých bublin, které projdou následně hromadným kolapsem [3].

Hromadné kolapsy jsou typicky charakterizovány kaskádovým zhroucením. Tlaková vlna vyvolaná kolapsem a odrazem jednotlivých bublin vede ke zvýšení rychlosti rozpadu sousedních bublin, tedy ke zvětšení amplitudy jejich vlastní tlakové vlny [3].

Reisman, Wang a Brennen zkoumali kolaps mračna bublin, který tvořil periodický rozpad. V závislosti na charakteristikách mračna prokázali, že tlaková vlna, která se šíří dovnitř, výrazně sílí v blízkosti středu mračna díky geometrickému zhuštění a tím zvyšuje možnost vzniku eroze [3].



Obrázek 9: Oblak kavitačních bublin [4]

3.1.4. Kavituující víry

Kavituující víry se objevují při smykových tocích (ponořená tryska v kapalině) a také na zadní straně jednotlivých kavitačních bublin, které uvolňují kavituující vírové struktury. Ty se zdají být zodpovědné za erozi v hydraulických strojích.

Některé testy příslušných zařízení jsou založeny na opakovaném působení axiálního zhroucení kavituujících vírů. Kavituující víry vytváří speciální typ vírového generátoru. Axiální zhroucení s rychlostí větší než $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ může být generováno v tomto zařízení tak, aby úroveň napětí, které je dáno Zukovského a Allieviho vzorcem (3.1), bylo řádově stejné jako při nárazu tlakové vlny nebo paprsku proudu. Následující dva hlavní rysy se zdají být přítomny při počátku vysoce erozivního potenciálu kavitačních vírů [3]:

- Tvorba mračna bublin na konci axiálního zhroucení, ve kterém může dojít k tvorbě kaskádového mechanismu.
- Poměrně dlouhá doba trvání zatížení, což je obvykle několik desítek mikrosekund.

Tabulka 1: Přehled mechanických zatížení mechanismů kavitačního opotřebení [3]

Mechanismy kavitačního opotřebení	Mechanické působení	Tlakové zatížení (MPa)	Doba trvání (μs)
Symetrický kolaps bubliny	Tlaková vlna	100	1
Paprsek kapaliny (pro bublinu o průměru 1 mm)	Náraz paprsku	150	0,03
Hromadný kolaps	Tlaková vlna	>>100	>>1
Kavitační víry	Náraz paprsku	>150	>10

3.2. Namáhání povrchu tělesa

Dříve zmíněné účinky mechanického působení kapaliny jsou charakteristické tím, že paprsek kapaliny či tlaková vlna, vznikající při kolapsu bubliny, účinně zasáhnou jen velmi malou část povrchu tělesa, která je srovnatelná s velikostí zrn či strukturních složek materiálů [2]. „*Silná lokalizovanost dynamického namáhání a rozdílné fyzikální vlastnosti strukturních složek materiálu podmiňují přednostní rozrušování některé složky mikrostruktury nebo hraničních vrstev mezi jednotlivými zrny či složkami mikrostruktury. Kavitační rozrušení tedy probíhá v „nejslabším“ místě.*“ [2] Můžeme říci, že odolnost materiálu vůči kavitačnímu rozrušení klesá s jeho rostoucí nehomogenitou. Další vlastností dynamického zatížení povrchové vrstvy materiálu je jeho mnohonásobné opakování, kdy je povrch tělesa jakoby „bombardován“ hydraulickými nárazy, které způsobují, že je materiál povrchové vrstvy opakovaně vystaven plastickým deformacím. To způsobí únavu materiálu a následně jeho vylamování [2].

Předešlé poznatky dokazují také experimenty, které prováděli Plesset a Ellis, jejichž cílem bylo vyšetřit účinky kavitace na povrch některých materiálů. Kavitační děj byl vyvolán stojatou akustickou vlnou o frekvenci 18 kHz a 24 kHz, při které pozorovali plastické deformace po celém povrchu zkoumaných vzorků. Díky tomu došli k závěru, že plastické deformace jsou způsobeny krátkodobými tlakovými rázy, následkem kterých dojde k únavě materiálu. Proto se domnívají, že mechanické působení tlakových pulsů je jedním z hlavních faktorů kavitačního opotřebení [2].

Takto zatížený povrch tělesa vyvolá složitý stav napjatosti v jeho povrchové vrstvě. Tloušťka povrchové vrstvy je závislá na velikosti zatížení a mezní hodnotě tečení materiálu. Mnohonásobné opakování tohoto zatížení způsobí na povrchu materiálu vznik zbrázdění či hrbolků (reliéfů), které nemusí být viditelné pouhým okem. Mechanické vlastnosti deformované povrchové vrstvy jsou zcela odlišné, než vlastnosti základního materiálu, a proto po určité době dojde na některých místech k odtržení zdeformované vrstvy od základního materiálu [2]. „*Uvnitř materiálu tak vznikne trhlinka, která může proniknout až na povrch*

tělesa. Růst těchto trhlinek a jejich spojování vede postupně k rozrušování povrchu tělesa.“ [2].

3.3. Elektrochemické procesy při kavitaci

Většina odborníků přes kavitaci zastává názor, že kolaps kavitační bubliny je provázen hydrodynamickými silami. Přesto existují i tací, kteří se domnívají, že elektrochemické procesy jsou hlavní příčinou kavitačního opotřebení a hydrodynamické síly mají jen druhořadý efekt [2].

Jedním z nich byl i Petracchi, který předpokládal, že kavitační opotřebení pevného tělesa je způsobeno elektrochemickými procesy, které vznikají díky elektrickým proudům v materiálu. Elektrické proudy, nacházející se v sousedních krystalech pevné látky, vznikají v důsledku rozdílných deformací, které jsou vyvolány v povrchové vrstvě tělesa díky dynamickým účinkům kolabujících bublin, a také v důsledku rozdílných mechanických napětí. Kavitační opotřebení v agresivním prostředí lze redukovat pomocí katodické ochrany. Tato skutečnost, kterou prokázal Nechleba, byla jedním z poznatků, z nichž vycházel Petracchi ve svých závěrech [2].

„Plessset se domníval, že účinek katodické ochrany je výsledkem menší koroze a snížených dynamických účinků kolabujících bublin na povrch tělesa. Chráněný povrch je totiž pokryt vrstvou vyloučeného vodíku (vznikl elektrolyzou vody, v níž byly experimenty prováděny), která tlumí mechanické účinky kapaliny na povrch tělesa.“ [2]

Elektrochemické procesy při kavitačním rozrušení jsou popsány takto: „Nárazem kapaliny na povrch tělesa, k němuž dohází při kolapsu bubliny, se v místě nárazu ohřeje relativně malá část materiálu. Tato teplejší část povrchové vrstvy tělesa tvoří s okolním chladným materiálem termoelektrický článek, který vyvolá elektrochemickou korozi povrchové vrstvy.“ [2] Koroze je definována jako rozrušení materiálů, nejčastěji kovů, chemickým či elektrochemickým působením mezi materiálem a okolním prostředím [2].

3.4. Vliv materiálu

„U měkkých kovů jako např. nikl, čistý titan apod., které mají napětí na mezi kluzu asi $3,5 \cdot 10^8$ Pa, vznikla trvalá deformace téměř současně se vznikem kavitace. Proto v povrchové vrstvě těchto kovů musela vznikat při kavitaci napětí větší nebo rovna napětí na mezi kluzu. U velmi pevných materiálů, jako např. wolframu, který má pevnost 10^9 Pa, byl počátek plastické deformace opožděn za počátkem kavitace. Plessset a Ellis svými pokusy ukázali, že při kolapsu bubliny vznikají v povrchové vrstvě kovu napětí v intervalu ($3,5 \cdot 10^8$; $10 \cdot 10^8$) Pa. V jiných experimentech bylo zjištěno, že kavitace vyvolává v pevných tělesech napětí až $13 \cdot 10^8$ Pa.“ [2]

Korozivní zdrsňení povrchů, které je často doprovázeno vznikem vrubů, napomáhá tvorbě nebezpečných trhlinek. Rychlost růstu těchto trhlinek je závislá na vlastnostech materiálu a do značné míry ovlivňuje vývoj kavitačního opotřebení [2].

Většina materiálů, které se vyznačují velkou odolností vůči korozivnímu opotřebení při statických podmínkách, např. v agresivní kapalině, je odolná také vůči kavitačnímu opotřebení. Není to však pravidlem. Např. zlato, sklo aj. se rozrušují při kavitaci velmi účinně, i přesto že jsou pasivní vůči korozi [2].

Kavitace může způsobit opotřebení povrchu jakéhokoliv materiálu, nehlédě na jeho tvrdost. Může vzniknout i v jiných kapalinách nežli je voda. Např. v tekutém sodíku, tekutém

lithiu, rtuti aj., kde je kavitační opotřebení stejného charakteru jako ve vodě. Kavitačnímu opotřebení se nevyhnu ani materiály chemicky inertní vzhledem k okolní kapalině. To bylo dokázáno při průtoku kapaliny skleněnou Venturiho trubicí, při kterém byly opotřebovány vnitřní stěny trubice. Silně rozrušovaným materiálem je také bakelit, u kterého lze prokázat, že byl rozrušen čistě mechanickým působením kapaliny, protože chemické či elektrolytické jevy nemohly při rozrušování bakelitu vzniknout [2].

Plesset a Ellis vyšetřovali vliv chemických reakcí na kavitační opotřebení. V jednom z jejich experimentů porovnávali kavitační opotřebení dvou totožných vzorků vyrobených z niklu v rozdílných prostředích. První vzorek ve vodě a druhý v odplyněném tekutém toluenu. Výsledkem experimentu byly plastické deformace o stejném charakteru a stejné velikosti v obou případech. Později vyměnili niklový vzorek za vzorek z nerezavějící oceli a dospěli k podobným výsledkům [2]. „Z uvedených příkladů je zřejmé, že nikoliv chemické, ale mechanické účinky jsou hlavním činitelem kavitačního opotřebení.“ [2]

3.5. Intenzita kavitačního opotřebení

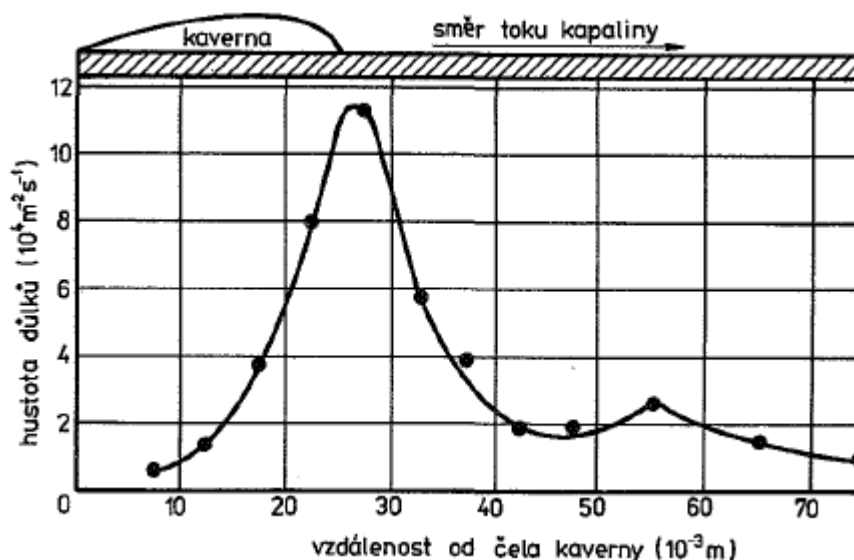
Snížením tlaku v proudící kapalině pod hodnotu tlaku nasycených par dojde ke zvětšení kavitační zóny a zvýšení počtu kavitačních bublin. To však neznamená, že postupným snižováním tlaku v proudící kapalině se zvyšuje intenzita kavitačního opotřebení. Skutečnost je o něco složitější [2].

Intenzita mechanismů kavitačního opotřebení vznikajících při kolapsu bubliny je závislá na rychlosti paprsku kapaliny a energii kulové tlakové vlny. Tyto veličiny jsou tím větší, čím větší je tlak kapaliny v blízkém okolí kavitační bubliny. Zvýšením tlaku v kapalině se ale sníží počet kavitačních bublin, z čehož vyplývá, že intenzita kavitačního opotřebení bude největší jen za určitého tlaku v proudící kapalině, kdy je vliv energie rázové vlny a počtu kolabujících bublin na kavitační opotřebení největší [2].

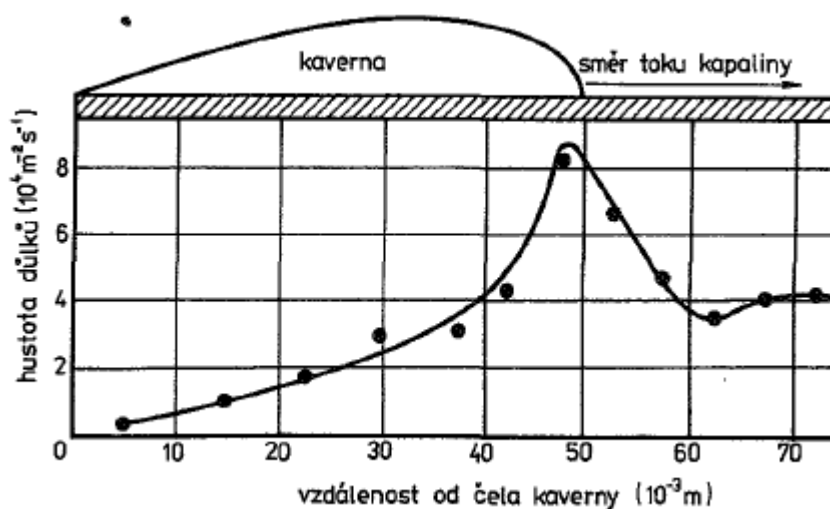
„Experimentálně bylo zjištěno, že místo rozrušení se nachází v dolní části kavitační zóny, ve směru proudu kapaliny.“ [2] K objasnění problematiky kavitačního opotřebení značně přispěl svými experimenty Knapp. Zpracováním snímků z vysokorychlostní kamery získal podrobný obraz o prostorovém i časovém vývoji kavitace. Ze snímků bylo patrné, že na povrchu vzorku (rotačního tělesa) se opakovaně tvoří kavitační kaverny, které za určitou dobu kolabují. Kaverna je bublina značných rozměrů, která se vyskytuje zpravidla v blízkosti povrchu tělesa [2].

Snímky kavitačních kaveren také dokazují, že rozhraní kaverny s kapalinou je při jejich periodickém tvoření průhledné a je poseto spoustou drobných bublinek, které se pohybují podél rozhraní směrem ke konci kaverny, kde zanikají. Tyto bublinky vnikají před přední částí kaverny, velmi rychle dosáhnou téměř maximální velikosti a po překonání této velikosti se jejich růst zpomalí. Rozměrového maxima dosáhnou po mnohem delší době než při počátku růstu [2].

Některé grafické výsledky pokusů, které prováděl Knapp, jsou znázorněny v Graf 1. Dle grafů je zřejmé, že největší hustota důlků, tj. největší intenzita kavitačního rozrušení, je v místech při konci kaverny. Obě velikosti kaveren mají i druhé maximum hustoty důlků. Toto maximum se nachází ve směru toku proudu. U delší kaverny je maximální hustota důlků značně nižší než u kaverny kratší. Prodloužením kaverny klesne maximální hustota důlků na konci kaverny a vzroste hustota důlků za kavernou [2].



Graf 1: Rozdělení důlků podél povrchu hliníkového vzorku obtékaného kapalinou pro kavernu délky 25,4 mm [2]



Graf 2: Rozdělení důlků podél povrchu hliníkového vzorku obtékaného kapalinou pro kavernu délky 50,8 mm [2]

Pokusy byly prováděny za konstantní rychlosti a snižováním tlaku před prostorem tunelu se docílilo prodloužení kaverny. Při těchto podmínkách byl pozorován v obou případech pohyb přibližně stejného počtu bublinek na povrchu kaverny a přírůstek počtu důlků za sekundu na povrchu vzorku nezávisel na její délce. Stejně tak intenzita není závislá na délce kaverny, pokud změny její délky bylo docíleno změnou tlaku za stálé rychlosti kapaliny. Počet bublin, které se vytvoří za jednotku času na povrchu kaverny, je především závislý na rychlosti kapaliny a vlastnostech kavitačních jader [2].

Rozdělením důlků podle velikosti můžeme zjistit, že se vyskytuje mnohem více větších důlků ve směru proudu než ve směru proti proudu. Delší kaverna má na povrchu větší počet

velkých důlků než kaverna kratší. To je způsobeno tím, že objem bubliny roste během pohybu po povrchu kaverny, takže na konci delší kaverny bude mít bublina větší objem než na konci kratší kaverny. Proto u delší kaverny je intenzita rozpadu bubliny a průměr důlku vyvolaný tímto rozpadem větší než u kaverny kratší [2].

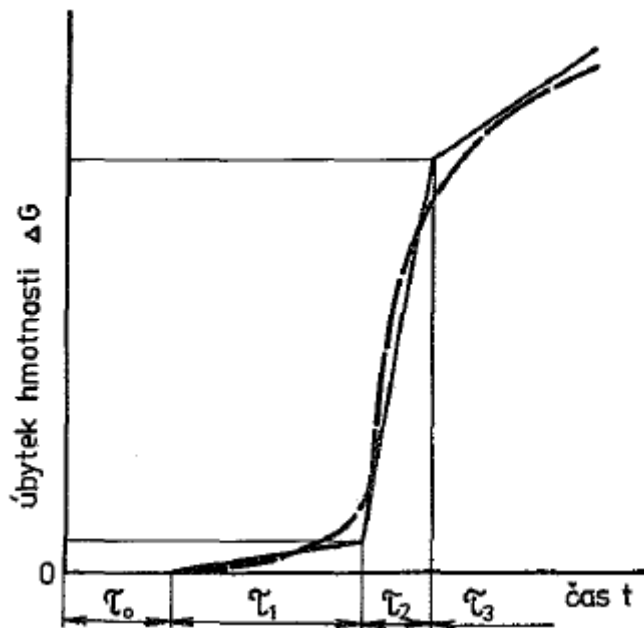
Díky tomuto zjištění zvolil Knapp frekvenci tvoření důlků na povrchu jednotkové velikosti jako míru *intenzity kavitačního opotřebení* I , která se vyskytuje v jednotkách $m^{-2} \cdot s^{-1}$. Intenzita kavitačního rozrušení je přibližně přímo úměrná šesté mocnině rychlosti kapaliny [2].

V grafech 1 a 2 vidíme, že kavitační rozrušení obtékaného povrchu je nerovnoměrně rozmístěno po kavitační zóně (kaverně). Nejvíce je rozrušen povrch na konci kaverny, kde bubliny zanikají za větších tlaků kapaliny. Výskyt dalších lokálních maxim kavitačního rozrušení, které se nachází za zadním okrajem kaverny, nasvědčuje, že některé z bublin se při zániku rozptýlí na mnohem menší bubliny, které jsou později zdrojem rázových vln [2].

Zvětšením kavitační zóny (kaverny) se posouvá její zadní okraj ve směru proudu. To znamená, že se posouvá i místo největšího kavitačního rozrušení povrchu. Pokud se změní podmínky proudění tak, že uzavření kavitační zóny se bude nacházet mimo obtékaný povrch, kavitační rozrušení na povrchu se výrazně zmenší. Tento typ proudění se nazývá superkavitační, a i při rozsáhle vyvinuté kavitaci bude rozrušení povrchu minimální [2].

3.6. Úbytek hmotnosti materiálů

Úbytek hmotnosti materiálu ΔG vzorku v závislosti na době působení kavitačního procesu t nám dává prvotní informace o chování materiálů při kavitačním opotřebení. Úbytek materiálu ΔG s časem roste. Průběh tohoto růstu v závislosti na čase je vyobrazen v grafu 3. Křivku závislosti $\Delta G = \Delta G(t)$ rozdělíme do několika časových intervalů [2].



Graf 3: Závislost úbytku hmotnosti ΔG na čase t při kavitačním rozrušení [2]

U většiny materiálů, které jsou vystaveny kavitačním účinkům, nedochází po tzv. inkubační dobu τ_0 ke znatelnějšímu úbytku materiálu. V tomto časovém intervalu se vzniklá mechanická energie spotřebovává převážně na vznik plastické deformace povrchové vrstvy [2].

Dále následuje období τ_1 , při kterém dojde k výraznému zvýšení rychlosti úbytku hmotnosti $d(\Delta G)/dt$ tělesa s časem. Čím delší je inkubační doba τ_0 a čím pomalejší je rozvoj kavitačního rozrušení v období τ_1 , tím odolnější je materiál vůči kavitačnímu rozrušení [2].

Ve třetím období τ_2 dosáhne rychlost úbytku hmotnosti rozrušovaného tělesa svého maxima a zůstává přibližně konstantní. Když je rozrušení povrchu tělesa poměrně rozsáhlé a úbytek hmotnosti rozrušovaného tělesa je značný, nastupuje poslední období τ_3 . Během něho rychlost úbytku materiálu s časem klesá [2].

Délka inkubační doby i celkový časový průběh kavitačního rozrušení značně závisí na vlastnostech materiálu rozrušovaného tělesa, na rychlosti proudu kapaliny, teplotě a tlaku kapaliny a také na množství plynů obsažených v kapalině. Zhruba platí, že čím tvrdší je rozrušovaný materiál, tím delší je inkubační doba τ_0 a rychlost úbytku materiálu menší [2].

4. Experimentální studium kavitačního opotřebení

Cílem této poslední kapitoly bylo zdokumentovat experimentální výzkum kavitačního opotřebení. Experiment probíhal za účelem získání znalostí o úběru materiálu při kavitaci. Mezi tyto znalosti patří hydraulické podmínky kavitačního jevu a také tvar a materiál vzorku, kdy se nejefektivněji rozrušoval jeho povrch. Experiment byl prováděn v laboratoři Energetického ústavu ve spolupráci s Ing. Martinem Hudcem. Na experimentu se také podílel Ústav materiálových věd a inženýrství, který poskytl jednotlivé vzorky.

4.1. Hydraulické tratě

Pro experiment byly postaveny dvě hydraulické tratě. Obrázky ze stavby tratě č. 1 jsou zobrazeny níže.



Obrázek 10: Připojení kompresorů k nádrži,
zdroj: Ing. Martin Hudec

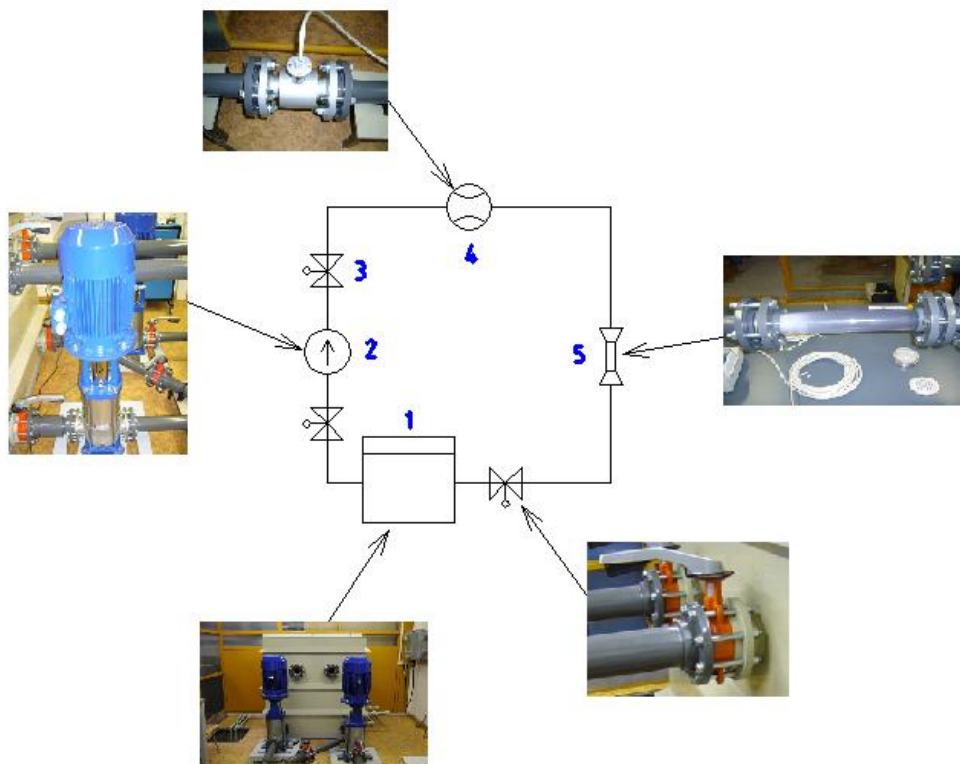


Obrázek 11: Připojení indukčního snímače do obvodu
tratě, *zdroj: Ing. Martin Hudec*



Obrázek 12: Podstavec pro vyztužení tratě, zdroj: autor

4.1.1. Trať č. 1



Obrázek 13: Schéma obvodu tratě č. 1, zdroj: autor

Samotný obvod tratě č. 1 (Obrázek 13: Schéma obvodu tratě č. 1, zdroj: autor se skládal z nádrže s vodou (1), odstředivého čerpadla (2), škrtecích ventilů (3), průtokoměru (4) a kavitační trubice (5), ve které je umístěn vzorek.

Použitá technika

Pro měření průtoku byl použit magneticko-indukční průtokoměr MQI 99 DN50 značky ELA, který se skládal z řídicí jednotky a vlastního indukčního snímače průtoku. Obrázky a technické parametry obou komponent jsou uvedeny níže.

Tabulka 2: Technické parametry řídicí jednotky [12]

Řídicí jednotka	
Přesnost měření	0,3 % z měřené hodnoty v rozsahu 10–100 % Q _{max}
Analogový výstup	galvanicky oddělený 4–20 mA
Teplota prostředí	–20 °C až 50 °C



Obrázek 14: Řídicí jednotka, zdroj: autor

Tabulka 3: Technické parametry indukčního snímače průtoku [12]

Indukční snímač průtoku	
Princip řízení	pulsní DC
Maximální teplota média	90 °C
Standardní tlakové zatížení	1,6 MPa



Obrázek 15: Indukční snímač průtoku, zdroj: autor

Čerpání vody a regulaci průtoku zajišťovalo odstředivé čerpadlo DPVSF 45-40 značky DP-Pumps.

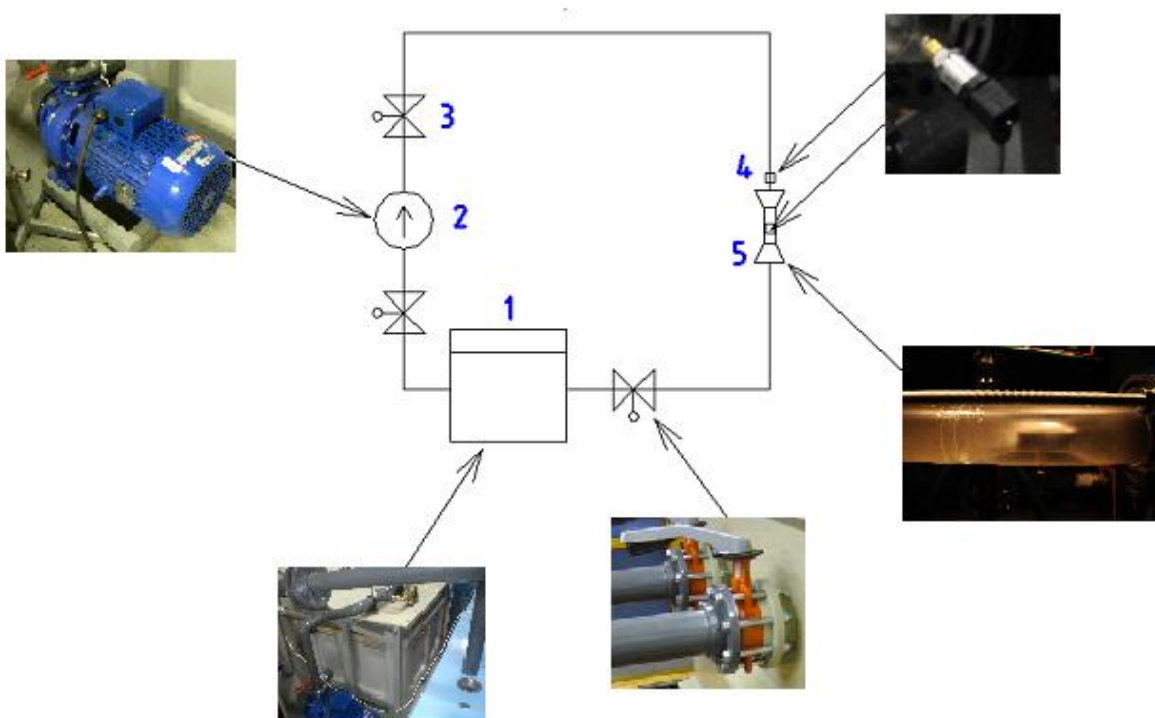


Obrázek 16: Odstředivé čerpadlo DPVSF 45-40, zdroj: autor

Tabulka 4: Technické parametry odstředivého čerpadla DPVSF 45-40

Odstředivé čerpadlo DPVSF 45-40	
Maximální výkon	15 kW
Maximální průtok	45 m ³ ·h ⁻¹
Frekvence	50 Hz

4.1.2. Trať č. 2



Obrázek 17: Schéma obvodu tratě č. 2, zdroj: autor

Obvod tratě č. 2 (Obrázek 17: Schéma obvodu tratě č. 2, zdroj: autor) se skládá z nádrže s vodou (1), odstředivého čerpadla (2), škrtkových ventilů (3), tlakových snímačů (4) a Venturiho trubice (5), ve které je umístěn vzorek.

Použitá technika

Pro získání hodnoty tlaku před Venturiho trubicí i v ní byly použity tlakové snímače DMP 331 značky BD SENSORS s.r.o.



Obrázek 18: Tlakový snímač DMP 331 [13]

Tabulka 5: Technické parametry tlakového snímače DMP 331 [13]

Tlakový snímač DMP 331	
Měřicí rozsah	0–1,6 bar
Proudový výstup	4–20 mA
Přesnost	0,25 %

Čerpání vody zajišťovalo odstředivé čerpadlo FHE 40-200/75/P značky LOWARA.



Obrázek 19: Odstředivé čerpadlo [14]

Tabulka 6: Technické parametry odstředivého čerpadla Lowara [14]

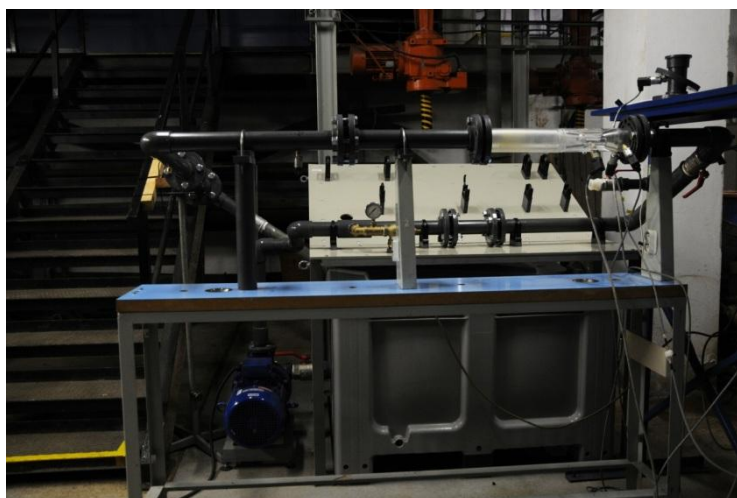
Odstředivé čerpadlo FHE 40-200/75/P	
Výkon	7,5 kW
Rozsah průtoků čerpadlem	18–48 m ³ ·h ⁻¹

4.1. Průběh experimentu

Experiment probíhal na dvou stanovištích ve dvou hydraulických tratích. Pro experiment byly vyhotoveny tři vzorky odlišných tvarů, velikostí a materiálů.



Obrázek 20: Hydraulická trať č. 1,
zdroj: autor



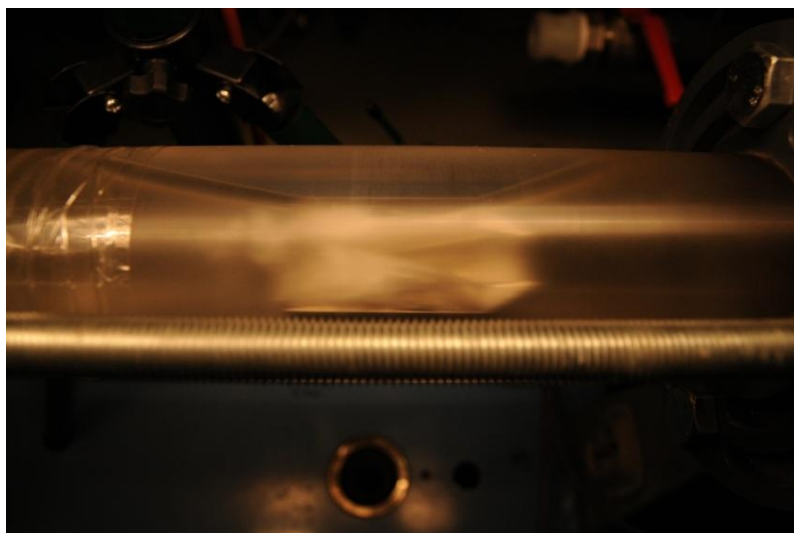
Obrázek 21: Hydraulická trať č. 2,
zdroj: Ing. Martin Hudec

4.1.1. Postup měření

Z vodní nádrže se čerpala voda do hydraulického obvodu pomocí odstředivého čerpadla. Magneticko-indukční průtokoměr a tlakové snímače zajišťovaly měření hydraulických podmínek, při kterých kavitační eroze rozrušovala materiál vzorku. Průtok hydraulickou tratí se reguloval přímo v odstředivém čerpadlu pomocí frekvenčního měniče, který je spojen s elektrickým motorem čerpadla. Škrtkové ventily byly plně otevřeny. Vzorky se nechávaly vloženy v tratích různou dobu (řádově několik dní) a poté se vážily na digitální váze. Kavitační jevy v obou tratích jsou znázorněny na obrázcích níže.



Obrázek 22: Kavitace za vzorkem č. 2 v trati č. 1,
zdroj: autor

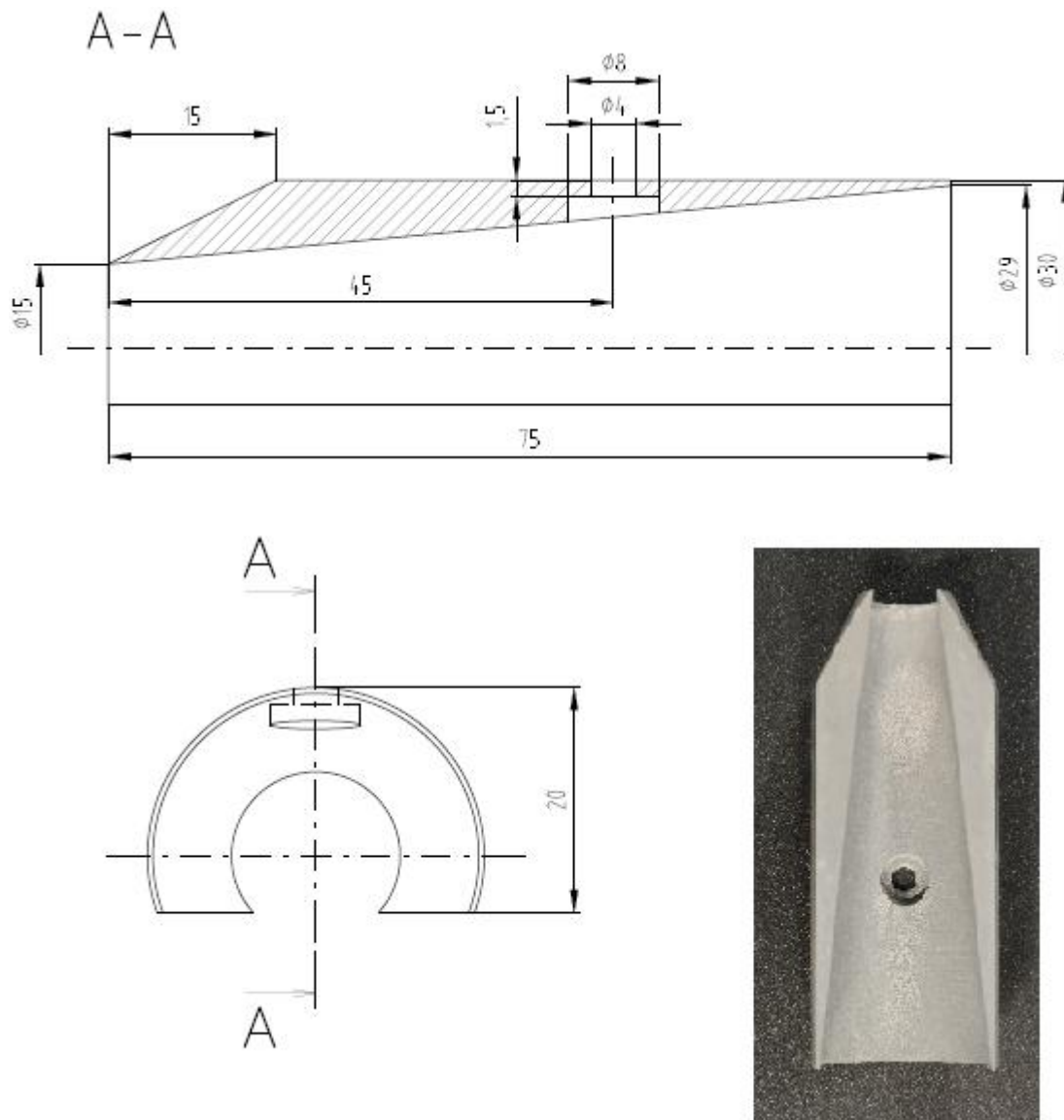


Obrázek 23: Kavitace ve Venturiho trubici v trati č. 2,
zdroj: Ing. Martin Hudec

4.1.2. Parametry jednotlivých vzorků a výsledky experimentu

Vzorek č. 1

Vzorek č. 1 je difuzor vyrobený z hliníkové slitiny třískovým obráběním na soustruhu bez dalšího opracování. Tento vzorek byl umístěn do plexisklové Venturiho dýzy, která je umístěna v hydraulické trati č. 2. Venturiho dýzu můžeme vidět na Obrázek 23: Kavitace ve Venturiho trubici v trati č. 2, zdroj: Ing. Martin Hudec s plně vyvinutou kavitací.

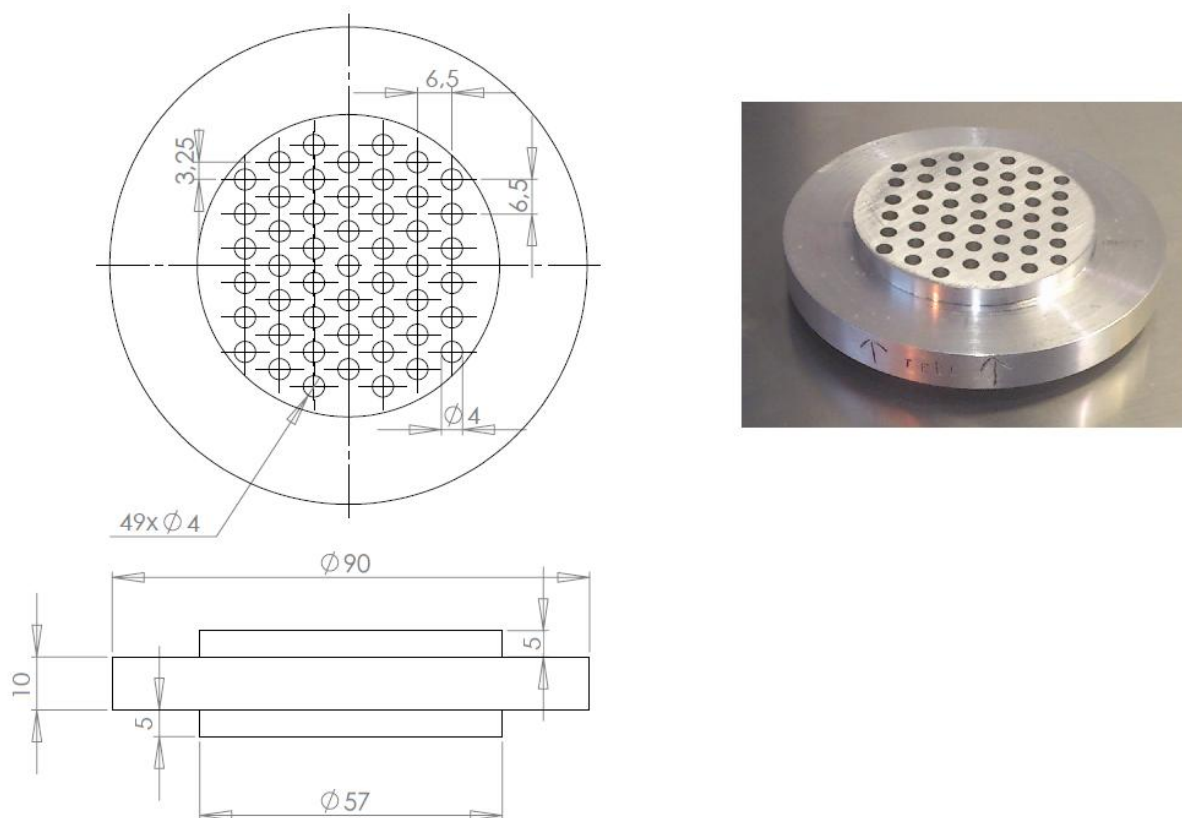


Obrázek 24: Výkres a 3D zobrazení vzorku č. 1,
zdroj: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. a Ing. Martin Hudec

Vzorek č. 1 měl dobré předpoklady pro efektivní úběr materiálu, protože byl vyroben z relativně měkkého materiálu. Nakonec byl za krátkou dobu nahrazen následujícími vzorky. Úbytek hmotnosti hliníkové slitiny měl hodnotu pouze 20 mg za 24 hodin působení kavitace.

Vzorek č. 2

Vzorek č. 2 je disk s množstvím otvorů, který může připomínat výstupní člen mlýnku na maso. Experimentu se podrobily dva typy vzorku č. 2, jeden s odstupňovanými otvory a druhý s otvory konstantního průměru. Tento vzorek je v porovnání se vzorkem č. 1 vyroben z o něco měkčí hořčíkové slitiny. Vyráběl se třískovým obráběním na soustruhu a vyvrtáním otvorů.



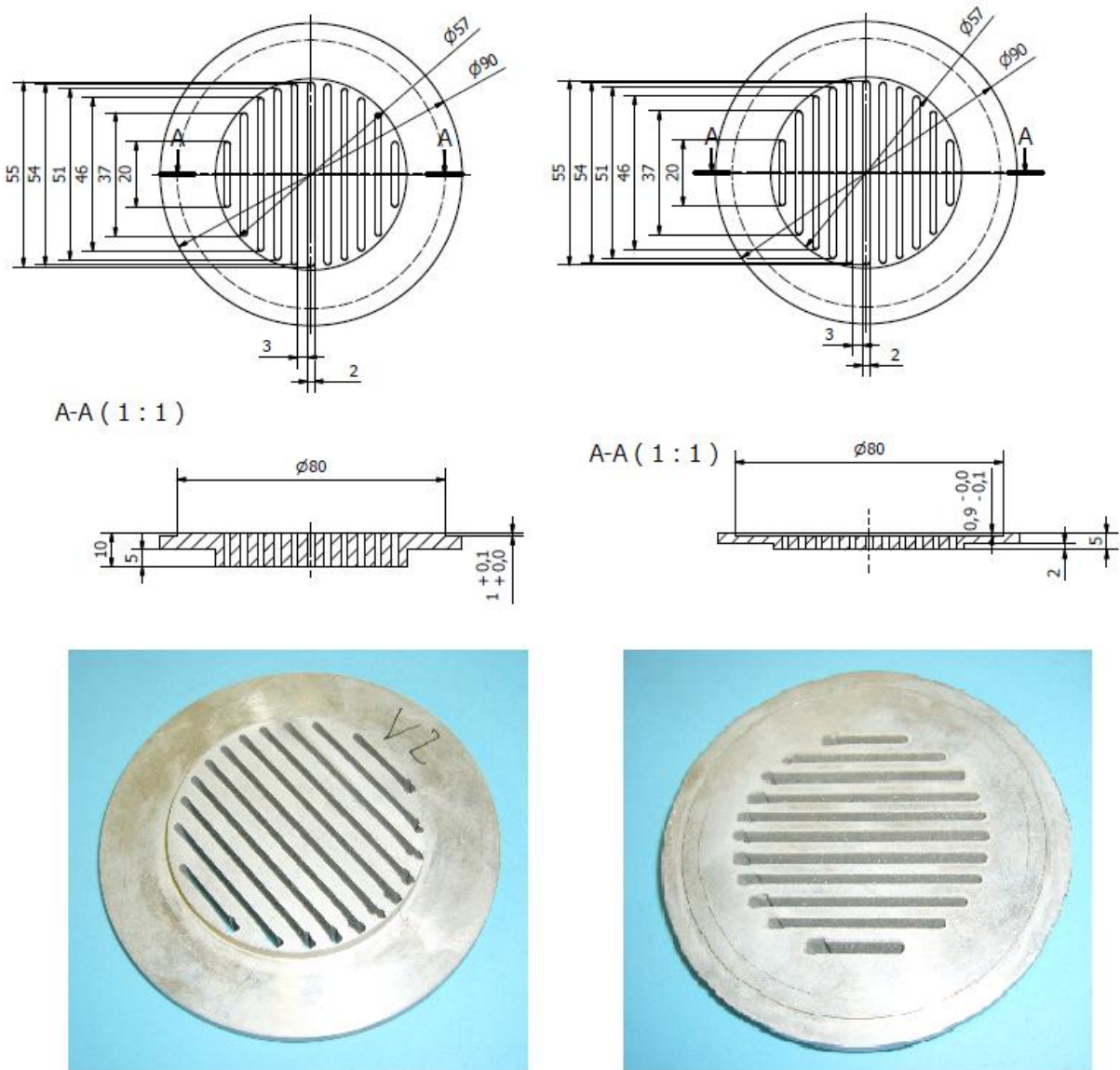
Obrázek 25: Výkres a 3D zobrazení vzorku č. 2,
zdroj: Ing. Martin Hudec

Tabulka 7: Výsledky měření vzorku č. 2

Vzorek	Doba působení kavitace (h)	Hmotnost (g)	Úbytek (g)
Vzorek s otvory konstantního průměru	-	136,72	-
	48,8	135,96	0,76
	25	135,81	0,15
Vzorek s odstupňovanými otvory	-	133,37	-
	23,83	132,93	0,44
	25,33	132,63	0,3

Vzorek č. 3

Třetí vzorek tvoří dva podobné disky s mřížkovými otvory. Jednotlivé disky byly vyrobeny ze stejné hořčkové slitiny jako vzorek č. 2 vyřezáním vodním paprskem. Disky jsou vzájemně pootočené o 90° a položeny na sebe. Následně jsou slepeny lepidlem.



Obrázek 26: Výkresy a 3D zobrazení disků ze kterých je složen vzorek č. 3, zdroj: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. a autor

Tabulka 8: Výsledky měření vzorku č. 3 při průtoku $Q=10 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$

Vzorek	Doba působení kavitace (h)	Hmotnost (g)	Příbytek (g)
Vzorek č. 3	-	91,13	-
	24,4	91,2	0,07

Vzorek byl vysoušen necelou hodinu při 80 °C. Jak je patrné z Tabulka 8, vzorek na hmotnosti vůbec neubyl, právě naopak jeho hmotnost narostla o sedm setin gramu. Předpokládá se, že to bylo způsobeno bobtnáním lepidla, kterým jsou spojeny jednotlivé disky. V současné době se zkoumají alternativy spojení těchto disků.

4.2. Zhodnocení experimentu

Výpočet úbytku hmotnosti vzorku č. 2 s otvory konstantního průměru za 24 hodin

$$\frac{0,76 + 0,15}{48,8 + 25} \cdot 24 = 0,296 \text{ g}$$

Výpočet úbytku hmotnosti vzorku č. 2 s odstupňovanými otvory za 24 hodin

$$\frac{0,44 + 0,3}{23,83 + 25,33} = 0,361 \text{ g}$$

Když porovnáme všechny výsledky vzorků, tak nejlépe (resp. nejhůře) si vedl vzorek č. 2 s odstupňovanými otvory. Díky svému specifickému tvaru a měkkému materiálu se vyšplhal úbytek jeho hmotnosti na hodnotu 0,361 g/24 h. O něco hůře dopadl vzorek č. 2 s otvory konstantního průměru vyrobený ze stejné slitiny. Jeho úbytek hmotnosti byl 0,296 g/24 h. Ze vzorků, které jsme byli schopni porovnat, nejhůře (resp. nejlépe) dopadl vzorek č. 1 ze slitiny hliníku, jehož úbytek byl 0,2 g/24 h. Výsledky vzorku č. 3 nebylo možné porovnat s ostatními, protože i přes to, že vzorek byl vystaven kavitaci a hmotnost jeho hořčíkové slitiny se zcela jistě snížila, hmotnost celého vzorku vzrostla díky chemickým reakcím mezi lepidlem a okolím. Na Obrázek 27 je zachycen vzorek č. 2 po několikadenním působení kavitace.



Obrázek 27: Vzorek č. 2 ovlivněný kavitací,
zdroj: Ing. Martin Hudec

Závěr

Téměř celá moje bakalářská práce je založena na degradaci materiálu kavitační erozí. Nemusím být inženýr, abych poznal, že příliš užitku kavitace asi nenadělá. V minulosti nazvali kavitaci nežádoucím jevem, protože ji neuměli ovládat a jediné, co dokázala, bylo snižovat životnost strojů. Za posledních několik let se však skutečnost otočila a místo toho, aby kavitace dále jen nepříznivě ovlivňovala hydraulické stroje, my jsme začali ovládat ji. Dnes bych ji nenazýval jevem nežádoucím nebo žádoucím, ale spíše nástrojem, který můžeme použít pro věci dobré či naopak. Samozřejmě, že kavitace bude přítomna v hydraulických strojích i nadále a musíme s ní počítat při jejich návrhu, v současnosti jsme však schopni snížit její intenzitu regulací provozních podmínek nebo správným návrhem stroje a tím i určit životnost stroje. Několik možností využití, která jsem uvedl v úvodu, mě nutí myslet si, že toto je jen začátek toho, co nás v budoucnu čeká. To byl také důvod, proč vznikl experimentální projekt, jenž jsem zdokumentoval v mé bakalářské práci. Jeho cílem bylo najít nejlepší tvar a materiál vzorku, který nejefektivněji rozrušovala kavitační eroze. Nicméně si dovolím říci, že je to jen malá část z celého experimentu, založeného na myšlence nalezení způsobu, jak tyto malé částice vydrolené z povrchu vzorku zachytávat a využít je pro jiné účely, například v práškové metalurgii. Kavitační eroze je děj v podstatě neprobádaný. Víme, co způsobuje a jak vzniká, ale jak jsem uvedl v kapitole kavitačního opotřebení, teorie mechanismů kavitační eroze nejsou zcela jednotné v její definici. Čím více znalostí budeme o průběhu kavitace či kavitační eroze získávat, tím více budeme schopni ji účelně využít. Já sám jsem velice zvědavý, na jaká z mnoha dalších využití přijdou vědci při svých pokusech, a ačkoliv to s tématem mé bakalářské práce tolik nesouvisí, nejvíce jsem v očekávání pokroku výzkumu superkavitace.

Použité informační zdroje

Literatura

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír. Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 333 s. ISBN 80-030-0206-0.
- [2] BRDIČKA, Miroslav; SAMEK, Ladislav; TARABA, Oldřich. Kavitace: Diagnostika a technické využití. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981, 332 s.
- [3] FRANC, Jean-Pierr; MICHEL, Jean-Marie. Fundamentals of cavitation. Boston: Kluwer Academic Publishers, c2004, xxii, 300 p. ISBN 14-020-2232-8.
- [4] BRENNEN, Christopher E. Cavitation and bubble dynamics. New York: Oxford University Press, 1995, xv, 282 p. ISBN 01-950-9409-3.

Internet

- [5] Kavitace. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013-03-24 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Cavitation_Propeller_Damage.JPG
- [6] Supercavitation. In: Ervivektripathi [online]. 2010-04-26 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://ervivektripathi.blogspot.cz/2010/04/supercavitation.html>
- [7] Cavitation Sparging System: Enhanced column flotation. In: Eriez: flotation division [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://en-ca.eriez.com/Content/Brochure/cavitationtube/columnflotationsystemscavitationtube>
- [8] Hydrodynamics: Cavitation. In: Fluids Engineering Lab. [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://flow.me.es.osaka-u.ac.jp/cav_e.html
- [9] Karman vortex street. In: Fuck Yeah Fluid Dynamics [online]. 2013-01-17 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://fuckyeahfluidynamics.tumblr.com/post/40766063719/the-von-karman-vortex-street-of-shed-vortices-that>
- [10] Cavitation. In: Soyama, Takakuwa and Aoyagi Laboratory [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.mm.mech.tohoku.ac.jp/menu10/surface/peening/Cavitation.htm>
- [11] LG Sonic VS Cavitation: Cavitation. In: LG Sound [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.lgsonic.com/lg-sonic-vs-cavitation/>
- [12] Magneticko-indukční průtokoměr MQI 99. In: ELA: Měřidla pro vodárenství [online]. Brno [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.elabrno.cz/mqi_99.htm
- [13] DMP 331: stainless steel sensor. In: BD Sensors: pressure measurement [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.bdsensors.de/en/industries/energy-industry-renewable-energy/details/produkt/dmp-331/>

- [14] Single stage pumps. In: Xylem: Let's solve water [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.lowara.com/single-stage-pumps_C1/fh-centrifugal-electric-pumps-in-compliance-with-en-733--din-24255_P2669/

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Jednotky	Význam
$\frac{dc_p}{dt}$	$[m \cdot s^{-1}]$	Zrychlení proudu
a	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku
c	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost proudu kapaliny
c_1	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost proudu vstupujícího do kanálu
c_2	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost proudu v nejužším místě kanálu
c_r	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost na okraji víru na poloměru r
c_v	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost volného proudu
c_{vir}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost v jádře víru na poloměru r_{vir}
d	[m]	Průměr válce
d_p	[m]	Průměr paprsku kapaliny
f	$[s^{-1}]$	Frekvence vzniku vírů
h	[m]	Výška výstupku
I	$[m^{-2} \cdot s^{-1}]$	Intenzita kavitačního opotřebení
l_K	[m]	Délka kavitační oblasti
p_1	[Pa]	Tlak ve vstupu do kanálu
p_2	[Pa]	Tlak v nejužším místě kanálu
p_2'	[Pa]	Místní tlak
p_k	[Pa]	Tlak v okolní kapalině
p_{kav}	[Pa]	Tlak nasycených par
p_{vir}	[Pa]	Tlak uvnitř víru
Q	$[l \cdot s^{-1}]$	Průtok
r	[m]	Poloměr na okraji víru
r_{B0}	[m]	Velký počáteční poloměr bubliny
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
r_{vir}	[m]	Poloměr v jádře víru
S_r	[-]	Strouhalovo číslo
t	[s]	Čas
V_j	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost paprsku kapaliny

Symbol	Jednotky	Význam
ΔG	kg	Úbytek hmotnosti materiálu
Δp	[Pa]	Změna tlaku
ν	[m ² ·s ⁻¹]	Kinematická viskozita
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota kapaliny
τ	[s]	Časové období
τ_0	[s]	Inkubační doba
x	[m]	Délka zrychlovaného sloupce kapaliny

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obrázky

Obrázek 1: Kavitační děj [4].....	10
Obrázek 2: Obtékání koule kapalinou při rychlosti $c=6,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [6]	11
Obrázek 3: Hydrodynamická kavitace [7].....	13
Obrázek 4: Vírová kavitace [8].....	14
Obrázek 5: Karmánovy víry [9].....	15
Obrázek 6: Kavitační eroze lodního šroubu [5].....	16
Obrázek 7: Mechanismy kavitačního opotřebení [10].....	17
Obrázek 8: Paprsek kapaliny (microjet) [11].....	18
Obrázek 9: Oblak kavitačních bublin [4].....	19
Obrázek 10: Připojení kompresorů k nádrži, zdroj: <i>Ing. Martin Hudec</i>	26
Obrázek 11: Připojení indukčního snímače do obvodu tratě, zdroj: <i>Ing. Martin Hudec</i>	26
Obrázek 12: Podstavec pro vyztužení tratě, zdroj: <i>autor</i>	27
Obrázek 13: Schéma obvodu tratě č. 1, zdroj: <i>autor</i>	27
Obrázek 14: Řídící jednotka, zdroj: <i>autor</i>	28
Obrázek 15: Indukční snímač průtoku, zdroj: <i>autor</i>	29
Obrázek 16: Odstředivé čerpadlo DPVSF 45-40, zdroj: <i>autor</i>	29
Obrázek 17: Schéma obvodu tratě č. 2, zdroj: <i>autor</i>	30
Obrázek 18: Tlakový snímač DMP 331 [13].....	31
Obrázek 19: Odstředivé čerpadlo [14].....	31
Obrázek 20: Hydraulická trať č. 1, zdroj: <i>autor</i>	32
Obrázek 21: Hydraulická trať č. 2, zdroj: <i>Ing. Martin Hudec</i>	32
Obrázek 22: Kavitace za vzorkem č. 2 v trati č. 1, zdroj: <i>autor</i>	33
Obrázek 23: Kavitace ve Venturiho trubici v trati č. 2, zdroj: <i>Ing. Martin Hudec</i>	33
Obrázek 24: Výkres a 3D zobrazení vzorku č. 1, zdroj: <i>doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.</i> <i>a Ing. Martin Hudec</i>	34
Obrázek 25: Výkres a 3D zobrazení vzorku č. 2, zdroj: <i>Ing. Martin Hudec</i>	35
Obrázek 26: Výkresy a 3D zobrazení disků ze kterých je složen vzorek č. 3, zdroj: <i>doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. a autor</i>	36
Obrázek 27: Vzorek č. 2 ovlivněný kavitací, zdroj: <i>Ing. Martin Hudec</i>	37

Grafy

Graf 1: Rozdělení důlků podél povrchu hliníkového vzorku obtékaného kapalinou pro kavernu délky 25,4 mm [2].....	23
Graf 2: Rozdělení důlků podél povrchu hliníkového vzorku obtékaného kapalinou pro kavernu délky 50,8 mm [2].....	23
Graf 3: Závislost úbytku hmotnosti ΔG na čase t při kavitačním rozrušení [2]	24

Tabulky

Tabulka 1: Přehled mechanických zatížení mechanismů kavitačního opotřebení [3]	20
Tabulka 2: Technické parametry řídicí jednotky [12].....	28
Tabulka 3: Technické parametry indukčního snímače průtoku [12].....	28
Tabulka 4: Technické parametry odstředivého čerpadla DPVSF 45-40.....	30
Tabulka 5: Technické parametry tlakového snímače DMP 331 [13].....	31
Tabulka 6: Technické parametry odstředivého čerpadla Lowara [14].....	32
Tabulka 7: Výsledky měření vzorku č. 2	35
Tabulka 8: Výsledky měření vzorku č. 3 při průtoku $Q=10\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	36