



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# ZKOUŠKY KAVITAČNÍ EROZE KAVITUJÍCÍM PAPRSKEM

CAVITATION TESTING USING CAVITATING JET

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Juraj Rovder

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2021



## Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: Bc. Juraj Rovder  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Fluidní inženýrství  
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.  
Akademický rok: 2020/21

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 diplomové práce:

### Zkoušky kavitační eroze kavitujícím paprskem

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kavitace je podstatným degradačním mechanismem při provozu hydraulických strojů. Při návrhu technologických opatření pro omezení kavitačního opotřebení (volba materiálu, žárové nástřiky povrchu) je nutné znát charakteristiky materiálů z pohledu kavitační eroze. Jednou z možností zrychleného testování je použití kavitujícího paprsku.

#### Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je nalezení optimálních parametrů pro testování kavitační odolnosti materiálů na experimentálním standu s kavitujícím paprskem. Testování proběhne pro vzorky slitiny hliníku, metodika se volně inspiruje normou ASTM G134–17. Výsledky budou využity při zkoušení kavitační eroze žárových nástřiků pro poškozená místa konstrukčních prvků vodních turbín.

#### Seznam doporučené literatury:

ASTM G134-17 Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by Cavitating Liquid Jet. ASTM, 2017.

SOYAMA, H. Cavitating Jet: A Review. Applied Sciences. 2020, 10(20), 7280. Dostupné z:  
doi:<https://doi.org/10.3390/app10207280>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Táto diplomová práca sa venuje problematike, ktorá sa zaoberá kavitáciou a jej účinkami. V tejto súvislosti popisuje mechanizmus vzniku a zániku kavít a kavitačné režimy. Vymenúva rôzne typy hydrodynamickej kavitácie. Uvádza Rayleigh-Plessetovu rovnicu a opisuje Micro-Jet. Ďalej vyzdvihuje kavitačnú eróziu a vplyvy kavitácie na niektoré druhy materiálov. Zaoberá sa tromi typmi testovania kavitačnej odolnosti, a to kavitačnými tunelmi, vibračným kavitačným systémom, podchytená normou ASTM G32, a v neposlednom rade kavitačnými tryskami, ktoré sa riadia normou ASTM G134-17. V korelácii s kavitačnými tryskami, rámkuje jej štyri základné parametre, ktorými sú vzdialenosť od vzorky, kavitačné číslo, rýchlosť zvuku a geometria dýzy. V závere teoretickej časti charakterizuje testovaciu stolicu. Praktická časť je zameraná na prevedenie experimentu. Najskôr uvádza postup pri realizovaní experimentu a následne tento experiment vyhodnocuje. Súčasťou vyhodnotenia je vizuálne pozorovanie vybraných vzoriek z materiálu AlCu4Mg1Mn1 a sledovanie kavitačnej erózie na konkrétnych vzorkách. Následne sú tieto údaje spracované formou grafov a tabuliek. Využíva mikroskop, ako nástroj na detailné pozorovanie vzoriek. Záver praktickej časti je venovaný zhodnoteniu experimentu.

## **Kľúčové slová**

kavitačná erózia, ASTM G134-17, kavitácia, Rayleigh-Plessetova rovnica, kavita, kavitačná tryska

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the issue of cavitation and its effects. In this context, it describes the mechanism of origin and implosion of cavities and cavitation regimes. It lists various types of hydrodynamic cavitation. It presents the Rayleigh-Plesset equation and describes micro jet. It also highlights cavitation erosion and the effects of cavitation on some types of materials. It deals with three types of cavitation resistance testing, namely cavitation tunnels, a vibrating cavitation system, supported by the ASTM G32 standard, and last but not least, cavitation nozzles, which follow the ASTM G134-17 standard. In correlation with cavitation nozzles, it frames its four basic parameters, which are stand of distance, the cavitation number, the speed of sound and the geometry of the nozzle. At the end of the theoretical part it characterizes the construction of test bench. The practical part is focused on performing the experiment. It first presents the procedure for carrying out the experiment and then evaluates this experiment. Part of the evaluation is the visual observation of selected samples of AlCu4Mg1Mn1 material and the monitoring of cavitation erosion on specific samples. First, these data are processed in the form of graphs and tables. It uses a microscope as a tool for detailed observation of samples. The conclusion of the practical part is devoted to the evaluation of the experiment.

### **Key words**

cavitation erosion, ASTM G134-17, cavitation, Rayleigh-Plesset equation, cavity, cavitation nozzle,



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

### **Citace tištěné práce:**

ROVDER, Juraj. *Zkoušky kavitační eroze kavitujícím paprskem*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/135734>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.

### **Citace elektronického zdroje:**

ROVDER, Juraj. *Zkoušky kavitační eroze kavitujícím paprskem* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/135734>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.



## **ČESTNÉ VYHLÁSENIE**

Vyhlasujem, že som diplomovú prácu s názvom Zkoušky kavitační eroze kavitujícím paprskem vypracoval samostatne s použitím uvedených zdrojov, ktoré tvoria prílohu práce.

.....  
Dátum

.....  
Meno a priezvisko



## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem vedúcemu tejto práce doc. Ing. Pavlovi Rudolfovi, Ph.D. za cenné rady a pripomienky. Taktiež by som sa chcel poďakovať, Bc. Kristíne Mrovčákovej, Ing. Marekovi Doubravovi a Ing. Martinovi Hudcovi za pomoc pri písaní tejto práce.

---

Podpis

## OBSAH

ÚVOD.....	15
1. Kavitácia.....	16
1.1. Mechanizmus vzniku kavít [5] .....	17
1.2. Kavitačné režimy [5] .....	19
1.3. Typy hydrodynamickej kavitácie [2].....	20
1.4. Rayleigh-Plessetova rovnica [2] .....	22
1.5. Zánik kavity .....	23
1.6. Micro Jet .....	24
2. Kavitačná erózia .....	27
2.1. Vplyv kavitácie na materiál [2, 6] .....	27
3. Typy testovania kavitačnej odolnosti .....	30
3.1. Kavitačné tunely .....	30
3.2. Vibračný kavitačný systém (ASTM G32) .....	30
3.3. Kavitačné trysky (ASTM G134-17) [1].....	31
4. Základné parametre kavitačnej trysky [9] .....	35
4.1. Vzdialenosť od vzorky.....	35
4.2. Kavitačné číslo.....	36
4.3. Rýchlosť zvuku.....	36
4.4. Geometria dýzy.....	38
5. Testovacia stolica .....	39
6. Experiment .....	42
6.1. Postup experimentu.....	44
7. Výsledky experimentu .....	46
7.1. Grafy a tabuľky (bod 5, 8) .....	46
7.2. Vizualne pozorovanie kavitačnej erózie .....	48
7.2.1. Vzorky 1-3.....	48
7.2.1. Vzorka č. 5 .....	50
7.2.2. Vzorky 7-9.....	51
7.3. Pozorovanie mikroskopom .....	54
7.3.1. Vzorka č. 5 .....	54
7.3.2. Vzorka č. 7 .....	55
7.3.3. Vzorka č. 8 .....	57
7.3.4. Vzorka č. 9 .....	59
7.4. Zhodnotenie .....	59

Záver .....	61
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	62

## ÚVOD

Diplomová práce je primárne zameraná na vplyv kavitačnej erózie na materiál. Zaoberá sa meraním a vyhodnocovaním miery kavitačnej erózie v nami navrhnutom experimentálnom zariadení. Tejto téme patrí náležitá pozornosť, nakoľko kavitácia v hydraulických zariadeniach je nežiadúcim javom, pretože má za následok znižovanie účinnosti stroja, zvýšenú hlučnosť a narastajúce mechanické namáhanie súčiastok. Ak sa kavitácia v stroji vyskytuje dlhodobo má za následok nevratné poškodenie obtekaných profilov. V extrémnych prípadoch čiastočné alebo úplné znefunkčnenie zariadenia. Z tohto dôvodu je nutné navrhnuť metódu vyhodnocovania kavitačnej odolnosti materiálov. Štandardizovaná testovacia metóda kavitačnej erózie, pomocou kavitačného lúča, bola navrhnutá a schválená v roku 2017 s označením ASM G134-17. Diplomová práca sa zaoberá aplikáciou tejto normy v našich podmienkach. [1]

Záverečná práca je rozčlenená do siedmich kapitol. Prvá kapitola sa venuje kavitácii, charakteristike mechanizmu vzniku kavít a kavitačným režimom, typom hydrodynamickej kavitácie a Rayleigh-Plessetovej rovnici. Opisuje zánik kavity a micro jet. Druhá kapitola sa zaoberá kavitačnou eróziou a vplyvom kavitácie na materiál. Tretia kapitola popisuje kavitačné tunely, vibračný kavitačný systém a kavitačné trysky, ako typy testovania kavitačnej odolnosti. Štvrtá kapitola definuje bazálne parametre kavitačnej trysky, a to konkrétne vzdialenosť od vzorky, kavitačné číslo, rýchlosť zvuku a geometriu dýzy. Piata kapitola opisuje testovaciu stolicu. Šiesta kapitola je venovaná samotnému experimentu, v rámci ktorého je uvedený podrobný postup. Posledná, siedma kapitola sa zaoberá vyhodnotením experimentu na základe vizuálneho pozorovania vzoriek mikroskopom z vybraného materiálu a kavitačnej erózie. Taktiež uvádza grafy a tabuľky. V závere zhodnocuje experiment. K vybraným vzorkám sú priložené fotografie, zobrazujúce priebeh kavitačnej erózie v čase.

## 1. Kavitácia

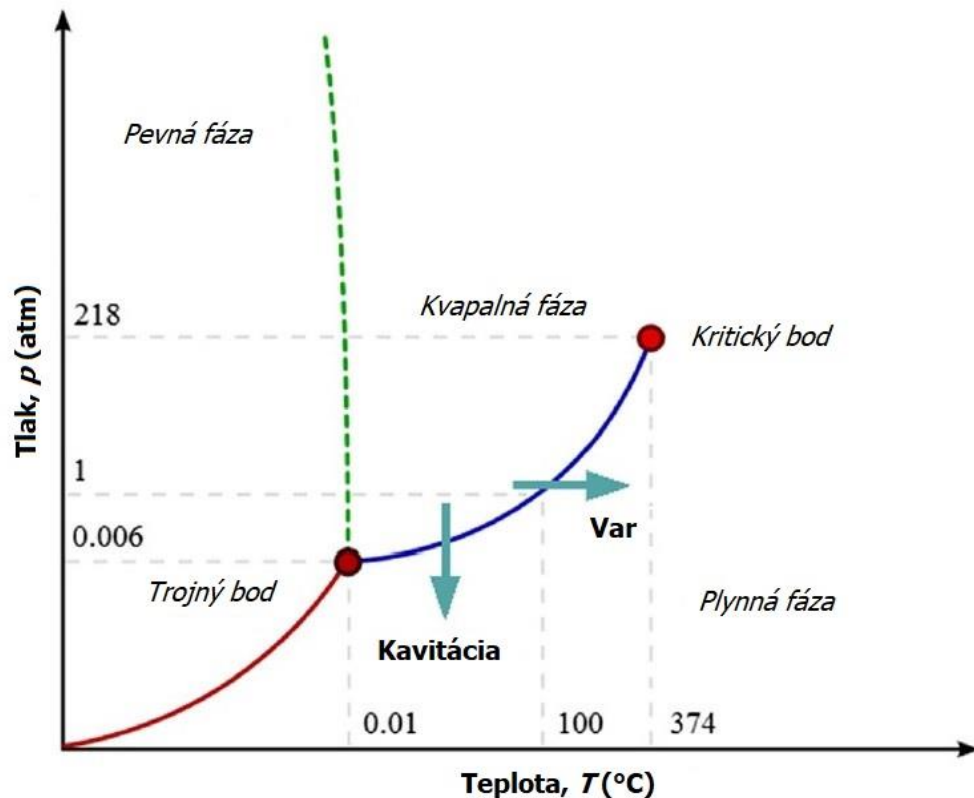
Pre základné pochopenie kavitácie je nutné ozrejmiť význam fázového diagramu vody (Obr.1). Diagram zobrazuje vplyv teploty (os x) a tlaku (os y) na zmenu skupenstva medzi ľadom, kvapalinou a plynom. Hlavnými bodmi sú trojný bod a kritický bod. Trojným bodom rozumieme taký tlak a teplotu vody pri ktorej dokážu všetky skupenstvá vody koexistovať. Konkrétne ide o teplotu 0,01 °C a tlak 611.73 Pa. Kritický bod je bod, v ktorom rozdiel medzi kvapalnou a plynnou fázou mizne. Krivka, ktorá spája trojný a kritický bod ( $T=374$  °C a  $p=22$  MPa) sa nazýva binodála (krivka nasýtenej pary) a je hranicou medzi kvapalnou a plynnou fázou vody. Na tejto hranici sú chemické potenciály oboch fáz v rovnováhe. [2]

Kavitácia je definovaná ako proces formovania bublín vodnej pary v kvapaline spôsobená znižovaním tlaku v pozorovanom objeme pri zachovaní konštantnej teploty. Princiálne ide o proces podobný varu a v oboch prípadoch je možné konštatovať, že ide o rovnaké fyzikálne a termodynamické procesy. Prvýkrát bola kavitačná pozorovaná vo Venturiho trubici roku 1894 anglickým vedcom Osbornom Reynoldsom, ktorý správne vyvodil záver, že zmena skupenstva je spôsobená znížením tlaku pod hodnotu tlaku sýtych pár ( $p_v$ ). Hodnota tlaku sýtych pár je funkciou teploty a je možné ju popísať polynómom tretieho stupňa (1). Ak sa tlak kvapaliny v okolí bubliny vráti nad hodnotu tlaku sýtych pár, bublina agresívne imploduje. [3]

$$p_v = 0,1462T^3 - 6,7925T^2 - 218,59T - 163,38 \quad (1)$$

Implózia kavity má za následok signifikantné zvýšenie tlaku a následnú rázovú vlnu. Ak sa tento jav vyskytne v blízkosti obtekaného materiálu, dochádza časom k jeho narušeniu/erózií. Mechanizmom kavitačnej erózie sa práca zaoberá v nasledujúcich kapitolách.

Podľa spôsobu indukovania bublín je možné rozdeliť kavitáciu na hydrodynamickú kavitáciu, akustickú kavitáciu, optickú kavitáciu a časticovú kavitáciu. Bubliny pary pri optickej a časticovej kavitácii vznikajú vplyvom energie prenesenej do kvapaliny pomocou koncentrovaného lúča elementárnych častíc (napríklad protónov) alebo fotónov (laser). Akustická a hydrodynamická kavitácia je spôsobená znižovaním tlaku v kvapaline pod hodnotu tlaku nasýtených pár. Pre túto prácu je z hľadiska jej zamerania relevantná iba hydrodynamická kavitácia, preto sa ďalej nebudeme zaoberať inými spôsobmi generovania kavít.



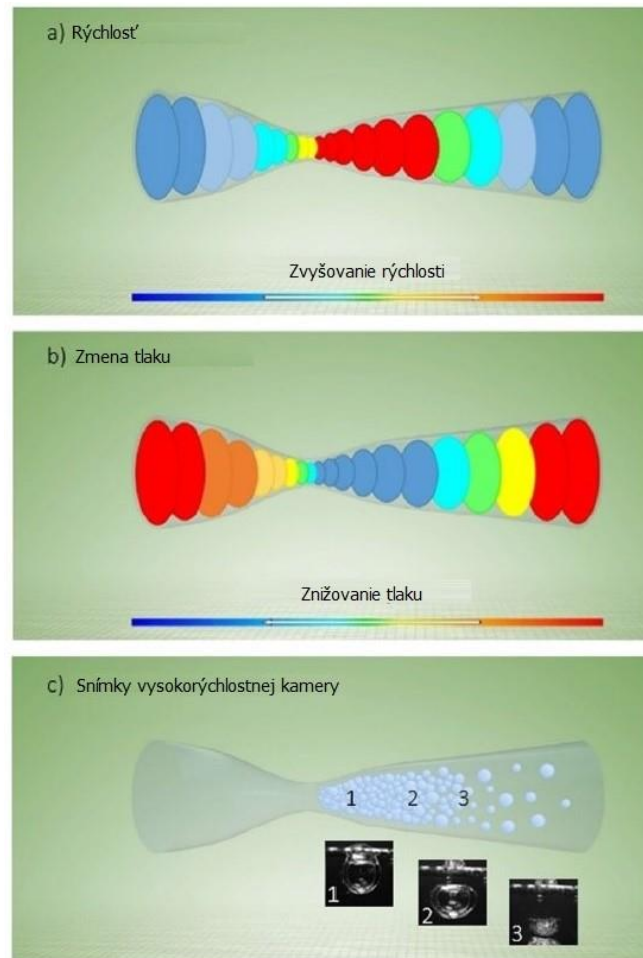
Obr. 1 Fázový diagram vody, zobrazujúci rozdiel medzi varom a kavitáciou [2]

### 1.1. Mechanizmus vzniku kavít [5]

Hydrodynamická kavitácia (HK) vzniká vplyvom znižovania tlaku v kvapaline dôsledkom Bernoulliho rovnice (2). Rovnica popisuje energetickú rovnováhu prúdiacej kvapaliny. Zvyšovaním rýchlosti prúdenia ( $v$ ) stúpa kinetická energia tekutiny, čo má za následok znižovanie tlakovej energie a následné znižovanie tlaku ( $p$ ). Ak je tento tlak rovný alebo nižší ako tlak nasýtených pár dochádza k zmene skupenstva z kvapalného na plynné.

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = konst. \quad (2)$$

Ak sú bubliny pary unášané prúdom do oblasti z nižším tlakom, bubliny rastú až kým nedosiahnu svoj maximálny rozmer. Ak rýchlosť prúdenia za týmto bodom náhle klesne, tlak sa vráti na hodnotu vyššiu ako je tlak nasýtených pár ( $p_v$ ) a bubliny náhle zaniknú implóziou. Tlaková vlna a lokálne zvýšenie teploty sú sprievodné javy, ktoré pri implodovaní kavity vzniknú.



Obr. 2 Zobrazenie priebehu tlaku a rýchlosti pri pretekaní Ventouriho trubicou

Kavitačné jadrá, miesta kde vznikajú zárodoky kavitačných bublín, nie sú náhodné a v kvapaline vznikajú v tzv. slabých miestach. Slabé miesta v kvapaline znižujú celkovú pevnosť v ťahu kvapaliny. Tieto slabé miesta môžu byť vytvorené vírmi v turbulentnej medznej vrstve. Ďalšími kandidátmi na potenciálne kavitačné jadrá sú aj látky, rozpustené v kvapaline, prípadne povrch malo zmáčavých častí armatúry alebo nádoby. Hlavným faktorom pri inicializácii kavitácie je nekondenzovaná para a mikrobubliny nerozpusteného plynu v kvapaline, ktoré výrazne znižujú pevnosť v ťahu. Dôsledkom toho kvapalina rýchlejšie inklinuje k vzniku kavitácie, a to aj pri tlakoch vyšších ako je tlak nasýtených pár.

Dôležitým pojmom pri popise kavitácie je kavitačná oblasť. Táto oblasť ohraničuje objem v kvapaline, v ktorom sa kavitácia vyskytuje. Môže byť ohraničená pevnou stenou alebo kvapalinou. Ak je kavitácia natoľko intenzívna, že ovplyvňuje energetické charakteristiky a prúdenie v zariadení, hovoríme o vyvinutej kavitácii.

Pri charakterizácii kavitujúceho prúdenia sa sleduje niekoľko kavitačných parametrov. Najdôležitejším z nich je kavitačné číslo  $\sigma$ , ktoré je popísané rovnicou (3). Tlak ( $p$ ) sa meria po prúde kvapaliny za kavitačnou oblasťou. Ďalšou neznámou je hodnota  $p_v$ , teda tlak nasýtených pár závislý na teplote prúdiacej kvapaliny, ktorý je možné vypočítať z rovnice (1).

V menovateli sa nachádza tlaková diferenciacia charakterizujúca systém. Hodnota  $\rho$  je hustota kvapaliny a neznámou  $v$  je označená rýchlosť prúdu v kavitačnej oblasti.

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2} \quad (3)$$

Kavitačné číslo vyjadruje pravdepodobnosť vzniku kavitácie v systéme a ide o bezrozmerné číslo. Kavitácia sa v systéme vyskytuje, ak je hodnota čísla nižšia ako kritické kavitačné číslo  $\sigma_v^* = 1$ . Avšak hodnota kritického kavitačného čísla nie je striktné definovaná a môže sa meniť v závislosti od množstva rozpustených plynov a iných nečistôt v kvapaline a mení sa v rozmedzí 1-2,79. Podľa tejto hodnoty rozlišujeme rôzne režimy púdenia [5].

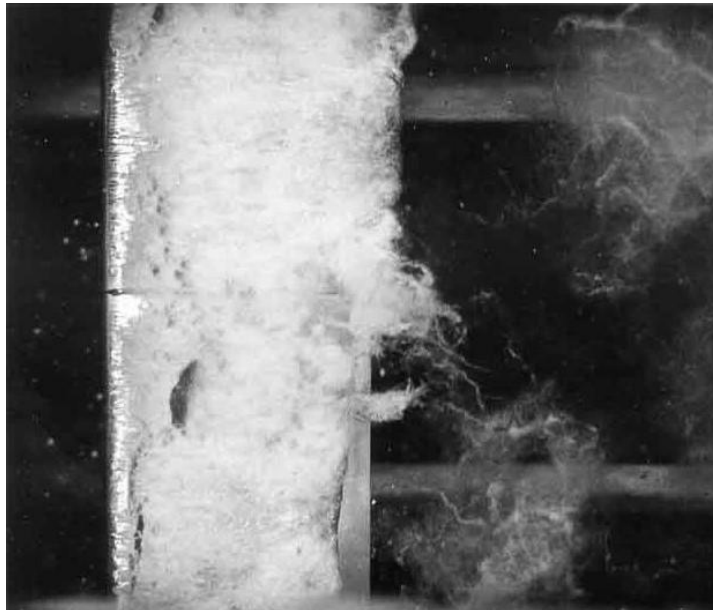
## 1.2. Kavitačné režimy [5]

- *Nekavitujuce prúdenie* ( $\sigma > \sigma^*$ )  
Ide o prúdenie, v ktorom je tlak v každom bode vyšší ako je tlak nasýtených pár. Nie sú pozorované žiadne známky kavitácie.
- *Počiatok kavitácie* ( $\sigma \leq \sigma^*$ )  
V tomto režime je kavitačné číslo rovné alebo menšie ako jeho kritická hodnota. Kavitácia je takmer nedetekovateľná s bublinami rozloženými v prúde. Je charakteristická vysokou akustickou emisiou, kvôli nestabilným kavitám, ktoré implodujú. Kavitácia neovplyvňuje prúdové pomery v systéme vôbec, prípadne len zanedbateľne.
- *Rozvinutá kavitácia* ( $\sigma \ll \sigma^*$ )  
Nižšie kavitačné číslo dovoľuje bublinám ich plné vyvinutie. Kavity je možné pozorovať voľným okom. Kavitačná oblasť je natoľko rozmerná, že ovplyvňuje prúdenie v zariadení.
- *Superkavitácia* ( $\sigma \ll \ll \sigma^*$ )  
Tento režim reprezentuje najvyššie štádium kavitácie. Tlak je dostatočne nízky na to, aby v kvapaline expandovalo veľké množstvo kavitačných jadier. Bublíny sú stabilné a v porovnaní s inými režimami zanikajú vo väčšej vzdialenosti až za obtekaným telesom.

Nedávne štúdie dokazujú, že kavitačné číslo ( $\sigma$ ) nemôže byť použité ako jediný parameter popisujúci režim prúdenia. Dôvodom je nemožnosť merania rýchlosti a tlaku v miestach, v ktorých sa kavitácia v rôznych zariadeniach vyskytuje. Ide napríklad medzilopatkové kanály v rotoroch hydrodynamických čerpadiel.

### 1.3. Typy hydrodynamickej kavitácie [2]

Ďalším spôsobom rozdelenia kavitácie je rozdelenie na základe jej podstaty a to na *vírovú* a *povrchovú*. Povrchová kavitácia sa dá ďalej rozdeliť podľa tvaru, respektíve podľa miesta vzniku. Tento druh kavitácie je ľahko identifikovateľný, pretože je charakterizovaný odtrhnutím prúdu od obtekaného telesa. Vzniká tak bublina vodnej pary čiastočne prichytenej k obtekanému telesu. Ak je bublina dostatočne veľká a obaľuje obtekané teleso môže nastať superkavitácia. Ak povrchová kavitácia vznikne na lopatkách obežných kolies alebo na iných hydraulických profiloch, hovoríme o *plošnej kavitácii* (Obr.3).



Obr. 3 Plošná kavitácia pozorovaná na profile NACA 4412 s uhlom nábehu  $12^\circ$  a  $\sigma = 1,05$  [2]

Ak vznikajúce unášané bubliny majú rádovo rovnaký rozmer ako pripojená kavita, hovoríme o *kapsovitej kavitácii*. Obr. 4 zobrazuje vznik, separáciu a zánik kapsovitej kavitácie na vibrujúcom hydraulickom profile. V praxi tento jav nastáva na vibrujúcich lopatkách kaplánových alebo francisových turbín, kde vibrácie vznikajú v dôsledku interakcie rotorových a statorových lopatiek. V mnohých prípadoch náhle skolabovanie celého kavitačného mraku zapríčiňuje intenzívny hluk a väčší potenciál k erózií ako pri podobnom ale nevibrujúcom profile. V dnešnej dobe je kapsovitá kavitácia je, aktívne skúmaným javom a na túto tému vzniká veľké množstvo štúdií zaoberajúce sa podmienkami vzniku kavít a modelovaniu takto kavitujuceho prúdenia [2].



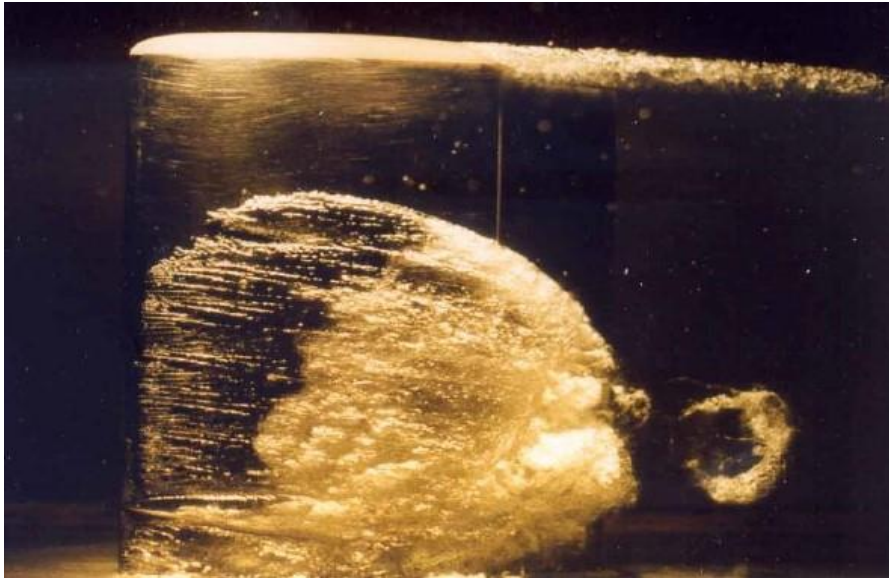
Obr. 4 Snímky zobrazujúce vznik, separáciu a zánik kavitačného oblaku na podtlakovej strane hydraulického profilu. Profil vibruje s frekvenciou 5,8Hz a amplitúdou  $\pm 5^\circ$ . Uhol nábehu je  $5^\circ$  a stredná hodnota  $\sigma = 1,1$  [2]

Mnohé, v praxi sa vyskytujúce prúdenia, s veľkým Reynoldsovým číslom obsahujú oblasť s intenzívnou vírivosťou. Príkladom takého typu prúdenia môže byť oblasť prúdu v savke vodnej turbíny alebo na špici hydraulického profilu lodnej skrutky. V jadrách týchto vírových štruktúr je tlak nižší ako ďalej od stredu víru. So zvyšujúcou sa intenzitou víru klesá hodnota statického tlaku v jadre pod hodnotu tlaku sýtych pár a nastáva zmena fázy z kvapalnej na plynnú. Takto generovaná kavitácia sa nazýva *vírová kavitácia* (Obr. 5).



Obr. 5 Vírová kavitácia za obežným kolom Francisovej turbíny a vizualizovaná Karmánová vírová cesta [2]

Vírová kavitácia sa môže vyskytovať vo všetkých druhoch vírov, ak sú dosiahnuté správne podmienky pre zmenu fázy. Táto kavitácia je vo svojej podstate prekvapivo stabilná a pri vysokých rýchlostiach prúdenia tvorí vysoko pretiahnuté štruktúry. Pomocou vírovej kavitácie je možné do určitej miery vizualizovať prúdenie, ako je znázornené na Obr. 5. Na ľavom obrázku je možné vidieť vizualizovaný vírový cop za obežným kolesom Francisovej turbíny. Na obrázku vpravo je zobrazená Karmánová vírová cesta za obtekaným hydraulickým profilom. Kavitujúce vírové krúžky sa môžu vyskytovať v blízkosti kapsovitej kavitácie vzniknutej na vibrujúcom hydraulickom profile. Tieto krúžky sa dokážu udržiavať aj vo väčšej vzdialenosti za obtekaným profilom. Obrázok 6 zobrazuje tento typ vírovej štruktúry za oscilujúcim čiastočne kavitovaným hydraulickým profilom. Krúžok má inú rýchlosť vzhľadom k rýchlosti prúdenia [2].



Obr. 6 Kavitující vírový krúžok v blízkosti kapsovitej kavítácie na hydraulickom profile oscilujúcom na frekvenciách 10Hz,  $C_v=0,5$  [2]

#### 1.4. Rayleigh-Plessetova rovnica [2]

Pri analytickom popise kavítácie je nutné pochopiť a predpovedať životný cyklus kavity. Na tento účel slúži Rayleigh-Plessetova rovnica (2), ktorá zastupuje analytický model pre popis kavítácie a životný cyklus jedinej bubliny. Rovnicu (4) prvý krát odvodil Rayleigh roku 1917. Neobsahovala však členy zohľadňujúce viskozitu ani povrchové napätie. V dnes známom tvare použil rovnicu Plesset roku 1949 na výpočet pohybujúcich sa kavitačných bublín. [2]

Hnacou silou dynamiky bubliny je tlak a jeho zmenou sa mení rozmer kavity. Pre zjednodušenie predpokladajme, že základným vstupným parametrom je tlak, médium sa nepohybuje a jediná rýchlosť v kvapaline je indukovaná rastom/kolapsom kavity. Predpokladaným výstupom rovnice je polomer bubliny závislý na čase  $R(t)$ . Toto spĺňa nasledujúca diferenciálna rovnica druhého stupňa:

$$\rho \left[ R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] = [p_v - p_\infty(t)] + p_{g0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3k} - \frac{2S}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \quad (2)$$

Základným predpokladom pri odvodzovaní rovnice je nestlačiteľnosť kvapaliny, čiže konštantná dynamická viskozita. Zároveň predpokladáme, že tlak a teplota vnútri bubliny sú v celom objeme bubliny rovnaké a ide o Newtonovskú kvapalinu.

V tomto zápise rovnice sú neznáme  $\dot{R}$  a  $\ddot{R}$  prvou a druhou deriváciou polomeru bubliny podľa času a  $R_0$  je počiatočný rozmer bubliny. Pravá časť rovnice sa skladá zo štyroch členov. Prvý z nich je rozdiel medzi tlakom kvapaliny a tlakom sýtych pár. Tento člen je najdôležitejší pretože od tohto člena závisí ďalší život kavity.

Ďalším, v poradí druhým, členom je príspevok nekondenzovaného plynu. Jeho množstvo je vypočítané za predpokladu, že počas celého cyklu (rast, kolaps) je konštantné, a že plyn sa správa izotermicky alebo adiabaticky. Izotermické správanie plynu počas cyklu môže byť predpokladané z dôvodu krátkych životných cyklov menších kavít. Ak sú však bubliny väčšie, je nutné predpokladať adiabatické správanie. Pre zjednodušenie predpokladáme polytropu

s koeficientom  $k$ . Polytropické správanie je opísané rovnicou (3) medzi tlakom plynu v bubline  $p_g$  a jej objemom  $V \sim R^3$ , kde index 0 značí počiatkové podmienky.

$$p_g R^{3k} = p_{g0} R_0^{3k} \quad (3)$$

Tretí člen, v pravej časti rovnice je príspevok povrchového napätia, kde  $S$  predstavuje povrchové napätie vyjadrené v N/m. tento člen má výrazný vplyv na správanie sa bubliny iba v prípade malých rozmerov.

Posledným členom rovnice je výraz pripočítavajúci vplyv dynamickej viskozity  $\mu$ . Tento člen je priamo úmerný rýchlosti deformácie bubliny  $\dot{R}$  a nepriamo úmerný jej polomeru  $R$ , preto je významný len pre malé bubliny, rovnako ako člen povrchového napätia.

Ak je vplyv nekondenzovaného plynu, napätia a viskozity zanedbateľný, ako napríklad v prípade s dostatočnou veľkosťou bubliny, rovnica je redukovaná na jednoduchú Rayleighovu rovnicu. Rayleighova rovnica (4) môže byť v prípade s konštantným  $p_\infty$  integrovaná a výsledkom bude rýchlosť explózie/implózie kavity (19).

$$\rho \left[ R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] = [p_v - p_\infty(t)] \quad (4)$$

$$\dot{R}^2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{p_v - p_\infty}{\rho} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{R} \right)^3 \right] \quad (5)$$

## 1.5. Zánik kavity

Kavita s obsahom plynu sa bude rýchlosťou kolapsu blížiť rýchlosti predpísanej rovnicou (5) asymptoticky. Po dosiahnutí minimálnej veľkosti začne oscilovať okolo novej menšej rovnovážnej hodnoty  $R$  danej iným okolitým tlakom  $p_\infty^*$ . Ak ale bublina obsahuje veľmi malé množstvo plynu, rýchlosť implózie sa zvyšuje kým nedosiahne minimálny rozmer  $R_{min}$  (6) kde člen  $p_{G0}$  je parciálny tlak plynu vnútri bubliny. V tomto momente tlak a teplota v bubline dosahuje najvyššie hodnoty dané rovnicami 7 a 8.

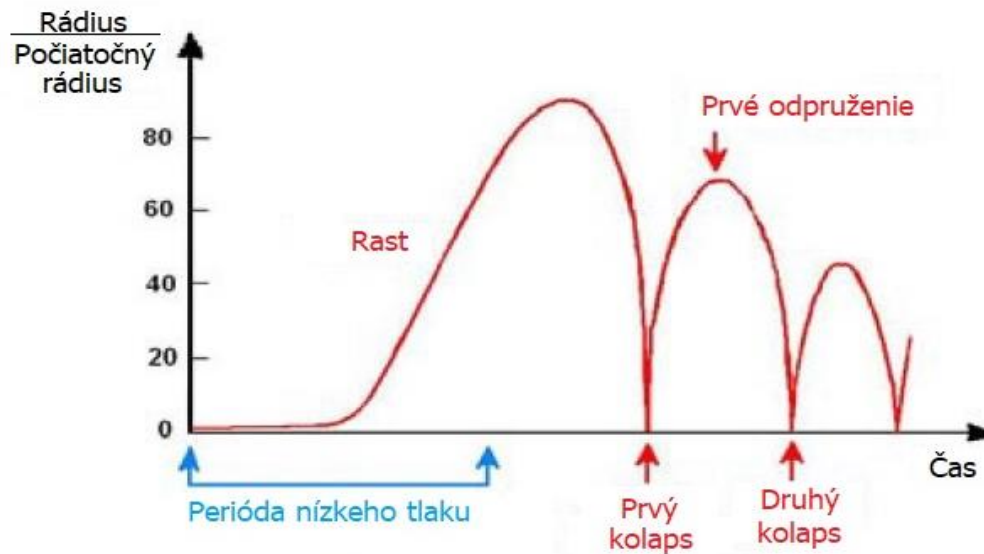
$$R_{min} = R_0 \left[ \frac{1}{(k-1)} \frac{p_{G0}}{(p_\infty^* - p_v - p_{G0} + 3S/R_0)} \right]^{\frac{1}{3(k-1)}} \quad (6)$$

$$p_{max} = p_{G0} \left[ (k-1) \frac{p_\infty^* - p_v - p_{G0} + \frac{3S}{R_0}}{p_{G0}} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (7)$$

$$T_{max} = T_0 \left[ (k-1) \frac{p_\infty^* - p_v - p_{G0} + \frac{3S}{R_0}}{p_{G0}} \right] \quad (8)$$

V typickom kavitujúcom prúde sa nachádzajú bubliny s rozmermi približne stokrát väčšími ako je ich počiatkový rozmer  $R_0$ . Ak by bol tlak nerozpusteného plynu v bubline s rozmerom  $R_0$  1 bar, tak pri dosiahnutí maximálneho polomeru  $R_{max}$  by mal hodnotu rádovo

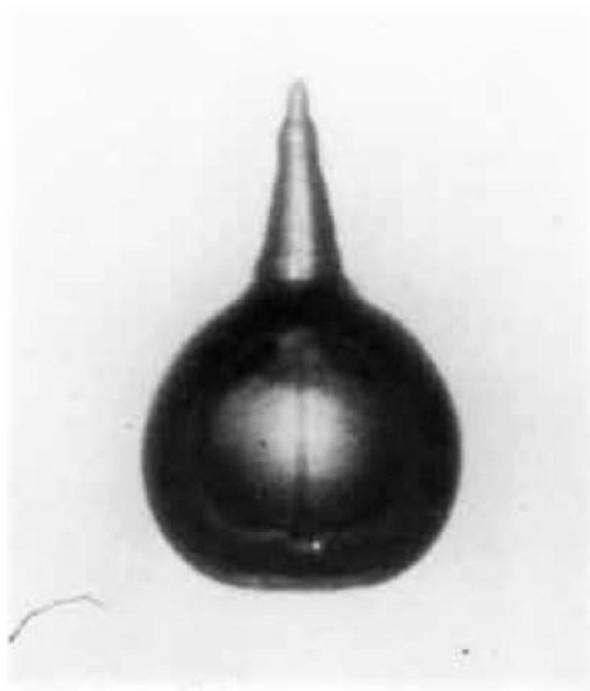
$10^{-6}$  baru. Pri kolapse kavity však rastú hodnoty tlaku na  $10^{10}$  baru a teplota vnútri bubliny dosahuje teplotu približne  $4 \times 10^4$  K.



Obr. 6 Zobrazenie správania sa bubliny v čase [6]

## 1.6. Micro Jet

Tento jav popisujúci úzky vysokorýchlostný prúd kvapaliny vzniká následkom nesymetrickej implózie kavity. Bublina kolabuje nesymetricky, pretože bublina sa nachádza v nestabilnom rovnovážnom stave a nemá symetrický tvar. Inými dôvodmi asymetrickej implózie môže byť pevná stena alebo iná bublina v blízkosti kavity, prúdenie kvapaliny ale aj gravitácia. Stena bubliny sa deformuje a vzniká prúd smerujúci do centra kavity.



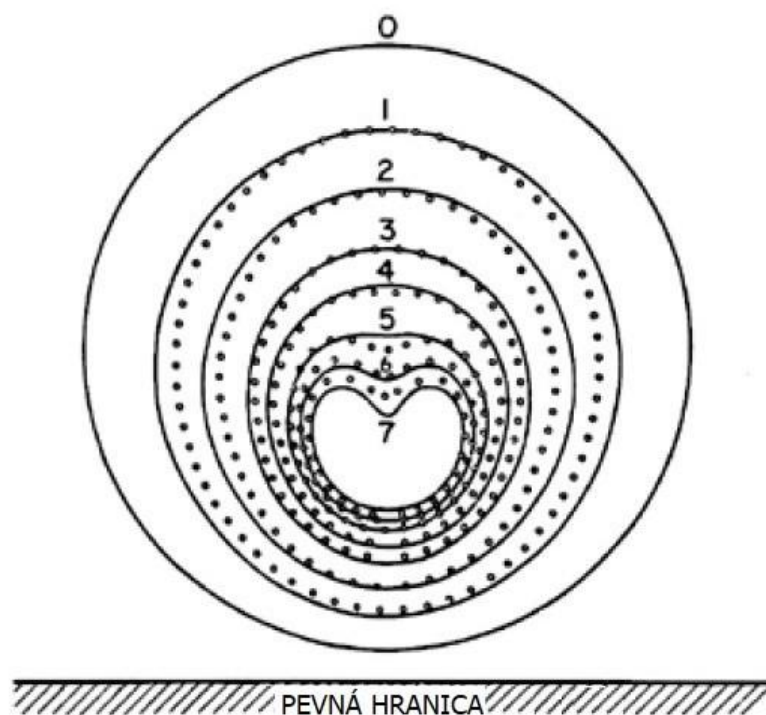
Obr. 7 Fotografia micro jet-u indukovaného gravitáciou smerujúceho zdola nahor skrz bublinu [2]

Ak kolaps prebieha v blízkosti pevnej steny, bublina kolabuje rýchlejšie na strane vzdialenejšej od steny. Tak sa vytvára prúd smerujúci na stenu a vráza do nej. Micro jet sa pohybuje rýchlosťou blízkou rýchlosti zvuku v kvapaline. V mieste dopadu vznikne tlaková špička a zvýšená teplota. To má za následok mechanické namáhanie materiálu.

Tlak vznikajúci v mieste dopadu je možné vypočítať pomocou rovnice (9). Kde  $\rho$  je hustota média,  $c$  je rýchlosť zvuku a  $v$  je rýchlosť micro jet-u. Pre vodu je hodnota  $\Delta p = 150\text{MPa}$  a doba počas ktorej tento tlak pôsobí na materiál sa pohybuje rádovo v mikrosekundách.

$$\Delta p = \rho cv \quad (9)$$

Iné druhy asymetrie dokážu indukovať micro jet-y v smere od pevnej steny. Existuje hraničná flexibilita povrchu, ktorá umožňuje vznik spätných prúdov v smere od povrchu. Je experimentálne dokázané, že pružné nátery alebo krycie vrstvy dokážu zabraňovať kavitačnej erózii práve vďaka dosiahnutiu dostatočnej pružnosti povrchu a tým obracajú smer micro jet-u smerom od povrchu. Ďalšou možnou asymetriou môže byť blízkosť susediacich bublín. Príkladom môže byť kavitačný mrak, ktorého bubliny nachádzajúce sa na okraji mraku majú tendenciu nasmerovať micro jet-y do stredu oblaku. [7]



Obr. 8 Obrázok znázorňuje postupnú deformáciu kavity a vytváranie micro jet-u v blízkosti pevnej steny [2]

Ak sa v objeme v blízkosti kavity nenachádza výraznejšia asymetria udávajúca tvar implodujúcej bubliny, môže vzniknúť deformácia vyššieho rádu. Tento jav dominuje, keď sa bublina pár zrúti ďaleko od steny. Preto je možné pri kolapse jedinej bubliny a jej následnom odpružení pozorovať generáciu kavitačného oblaku tvoreného omnoho menšími bublinami.

Príklad je uvedený na obrázku 9. Brennen [2] demonštruje, že nestabilný režim závisí na dvoch parametroch, a to na povrchovom napätí a nekondenzovateľnom plyne v bubline.



Obr. 9 Fotografie zobrazujúce implóziu kavity v glyceríne pred a po kolapse a odpružení [2]

## 2. Kavitačná erózia

Efekty sprevádzajúce zánik kavity mechanicky ovplyvňujú materiál. Ak sa kavitácia vyskytuje v zariadení dlhodobo, cyklické zaťažovanie má za následok tvorbu mikroskopických jamiek na povrchu, a tým jeho zdrsňovanie. Zvýšená drsnosť obtekaného povrchu negatívne vplýva na vlastnosti prúdenia v okolí, ktorý sa stáva náchylnejší na výskyt kavitácie. Tak vzniká pozitívna spätná väzba. Postupná akumulácia poškodenia a rozširovanie ovplyvňovaného povrchu, vedie časom k úplnej strate geometrie obtekaného profilu.



Obr. 10 Kavitačná erózia lopatky čerpadla [2]

### 2.1. Vplyv kavitácie na materiál [2, 6]

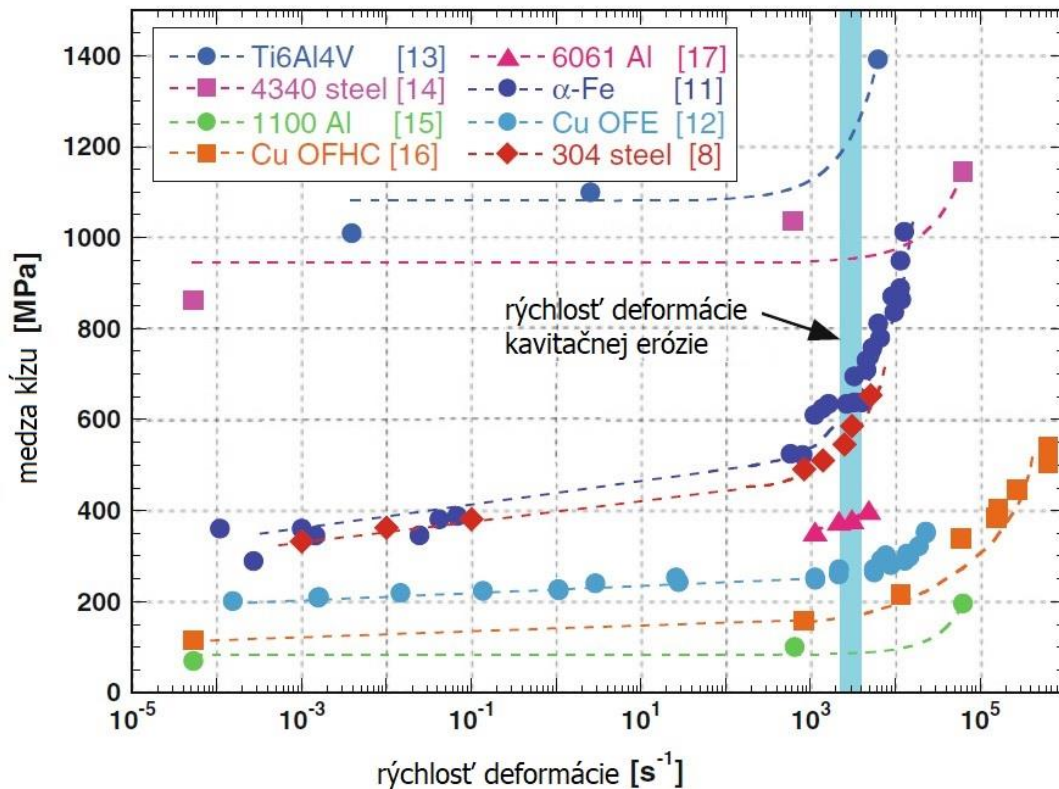
Micro jet-y a tlakové pulzácie, vyskytujúce sa počas implózie v blízkosti povrchovej vrstvy materiálu, generujú ťahové napätie, ktoré je rovné alebo väčšie ako je medza pružnosti materiálu. Účinky vodných rázov a tlakových vln vedú ku kumulácii poškodenia materiálu v podobe defektov mriežky a zodpovedajúcej plastickej deformácii. Dochádza k únave materiálu, ktorá môže mať za následok únavový lom. Prechod medzi prvými známkami erózie a únavovým lomom nie je lineárny v čase. Materiál spočiatku prechádza inkubačnou dobou, počas ktorého nedochádza k úbytku materiálu, ale iba k jemným plastickým deformáciám.

Ak je materiál korodovaný, je vystavený vyššiemu riziku kavitačnej erózie. Korózia spôsobuje mierne, ale veľmi nebezpečné praskliny, ktoré sa časom rozširujú a zväčšujú. Väčšina materiálov odolných proti korózii je tiež dobre odolná proti kavitačnej erózii.

Rýchlosť deformácie kavitačného impulzného zaťaženia sa dá odhadnúť buď z analýzy implodujúcich kavít alebo z deformačného napätia materiálu. V oboch prípadoch je možné, podľa definície, vyjadriť rýchlosť deformácie pomocou nasledujúcej rovnice:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta t} = \frac{v}{l} \quad (10)$$

Kde  $\Delta \varepsilon$  relativná deformácia, ktorá vznikla za čas  $\Delta t$ . Neznáma  $l$  je rozmer deformovanej oblasti a  $v$  je rýchlosť deformácie s jednotkou  $\text{ms}^{-1}$ . Z rovnice (10) je možné vidieť, že  $\dot{\varepsilon}$  je merané v jednotkách  $\text{s}^{-1}$ .



Obr. 11 Vplyv rýchlosti deformácie a medze kлізу rôznych materiálov [6]

Z obrázku 11 je možné vidieť, že pre hodnoty  $\dot{\varepsilon} < 10^3 \text{ s}^{-1}$  nemá rýchlosť deformácie výrazný vplyv na medzu kлізу. Ak je táto hodnota prekročená dochádza k spevňovaniu materiálu. Tlakové pulzácie najčastejšie spôsobujú deformáciu  $\Delta \varepsilon = 3-4\%$  a v extrémnych prípadoch  $16\%$ . Doba trvania sa v priemere pohybuje na hodnote  $10\mu$ .

Kavitačná erózia stúpa so zväčšujúcou sa rýchlosťou prúdenia relatívne k stene profilu. Závislosť straty hmoty na rýchlosti prúdenia, môže byť vyjadrená rovnicou (11).

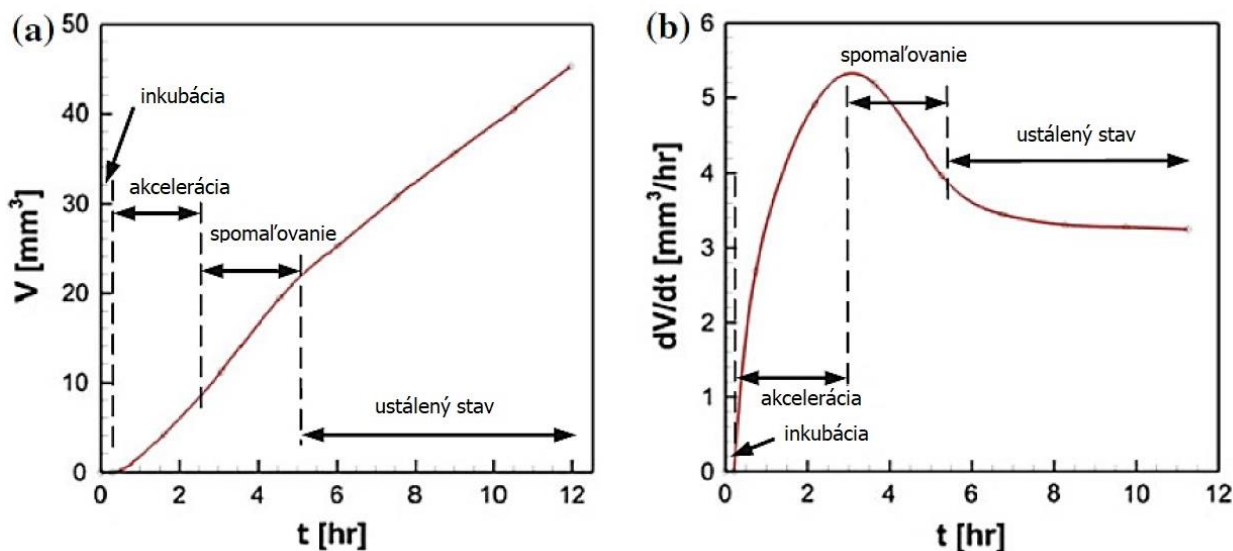
$$\dot{m} = k(v - v_0)^n \quad (11)$$

Parameter  $n$  sa pohybuje v rozmedzí 4-9. Rýchlosť  $v_0$  je kritická rýchlosť prúdenia, pri ktorej sa kavitácia vyskytuje a hodnota  $v$  označuje aktuálnu rýchlosť prúdenia. Napríklad kritická rýchlosť prúdenia pre nerezovú oceľ STN 17349 (AISI 316L) je  $20\text{ms}^{-1}$ . [8]

Výpočet objemovej straty  $V^*$  [ $\text{mm}^3$ ] predstavuje ďalšiu možnosť charakterizovania kavitačnej erózie. Pre rôzne materiály je však nutné experimentálne určiť vzorec. Rovnica (12) je príkladom pre výpočet objemovej straty pre zliatinu hliníka Al 7075, ktorá bola získaná vyhodnotením experimentu podľa normy ASTM G134-17, kde hodnotou  $v_{jet}$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] označujeme rýchlosť prúdenia kvapaliny z trysky. [6]

$$V^* = 1,2 \cdot 10^{-9} \cdot v_{jet}^{4,43} \quad (12)$$

Hmotnostná a objemová strata sa mení v čase. Hovoríme o inkubačnej dobe, perióde zrýchľovania, perióde spomaľovania a ustálenom stave. Na obr. 12 sú zobrazené priebehy objemovej straty v čase.



Obr. 12 Priebeh objemovej straty v čase a) kumulatívny, b) rýchlosť objemovej straty

Inkubačná doba je čas, počas ktorého sa na povrchu materiálu objavujú mikroskopické jamky. Dôvodom vzniku je plastická deformácia. Tá vedie k spevňovaniu povrchu, vid'. odstavce vyššie. Jemné zdrsňovanie povrchu je viditeľné iba na brúsených a leštených povrchoch.

Periódou zrýchľovania (akumulácie) je charakterizovaná tvorba prasklín medzi jednotlivými zrnami materiálu a ich postupným uvoľňovaním. Rýchlosť úbytku materiálu je silne závislá na voľbe materiálu a na technologickej úprave súčiastky.

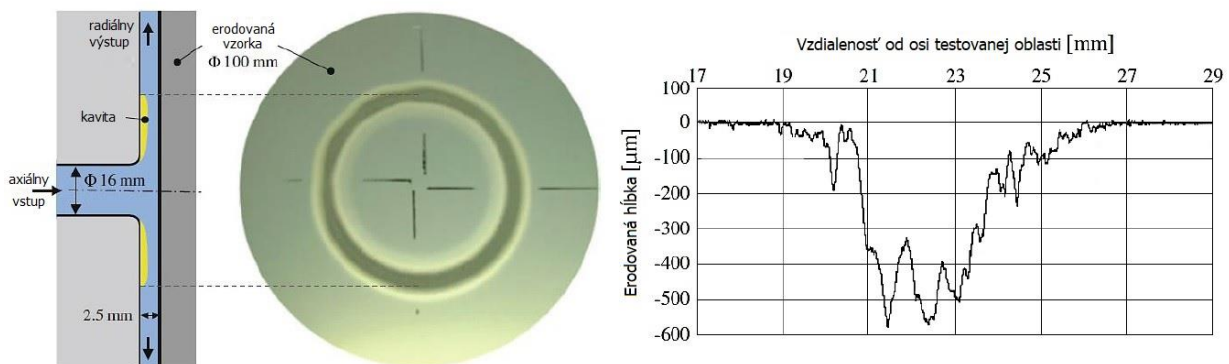
Periódou spomaľovania nastáva, keď je prvotný povrch úplne erodovaný. To má za následok zmenu v charaktere prúdenia a zániku kavít. S postupným zdrsňovaním je povrch náchylnejší na zachytávanie plynových bublín, ktoré oslabujú tlakové pulzácie, ovplyvňujúce materiál.

Ustálený stav je dosiahnutý vtedy, keď sú tlmiace účinky zachyteného plynu a účinky tlakových vln vyrovnané. Ďalší priebeh rýchlosti úberu materiálu v čase sa stabilizuje a kumulatívna objemová strata nadobudne lineárny priebeh v čase.

### 3. Typy testovania kavitačnej odolnosti

#### 3.1. Kavitačné tunely

Kavitačnými tunelmi rozumieme zariadenia schopné dosiahnuť rýchlosti prúdenia približne  $90 \text{ ms}^{-1}$  a tlaky 4 MPa. Najčastejšie je zariadenie navrhnuté tak, že samotný pracovný priestor axiálne smerovaného vstupu, má priemer 16 mm. Prúd je ďalej smerovaný radiálne do štrbiny so šírkou 2,5 mm, protiľahlá stena štrbiny je tvorená skúšobnou vzorkou. Následne sa prúd odtrháva a vznikne veľmi agresívna kavitácia. Tento druh testovania sa používa hlavne pre kavitačne odolné materiály, práve z dôvodu vysokej intenzity kavitácie. Kavitačné číslo je v zariadení tohto typu regulované pomocou tlakovej nádoby.



Obr. 13 Schéma pracovnej oblasti popísaného kavitačného tunelu

#### 3.2. Vibračný kavitačný systém (ASTM G32)

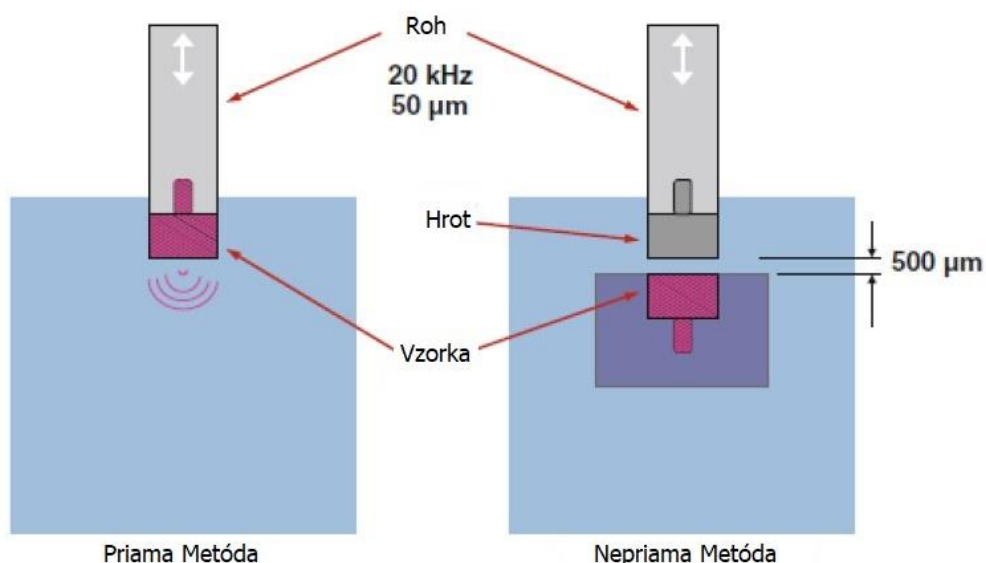
Toto zariadenie využíva ultrazvuk na generovanie akustickej kavitácie. Vibrujúci člen je rozkmitaný na frekvenciu 25 kHz s amplitúdou  $25 \mu\text{m}$ . Tak vznikajú v kvapaline pulzácie s maximálnym tlakom 4,7 MPa v ťahu/tlaku. Existujú dve varianty tejto metódy.

Priama metóda testovania spočíva v pevnom spojení testovanej vzorky a ultrazvukového rohu. Po rozkmitaní vzniká okolo vzorky kavitačný mrak polgulovitého tvaru, sústredený okolo centra vzorky. Preto sa pri tejto metóde objavuje kavitačná erózia hlavne v osi vzorky.



Obr. 14 Charakter erodovaného povrchu vzorky priamej (vľavo) a nepriamej metódy (vpravo)

Nepriama metóda je principiálne rovnaká, rozdiel spočíva v umiestnení vzorky tesne pod vibrujúci člen. Spravidla je medzera široká 500  $\mu\text{m}$ . V štrbine vzniká kavitačná oblasť na celom povrchu.



Obr. 15 Rozdiel medzi priamou a nepriamou metódou

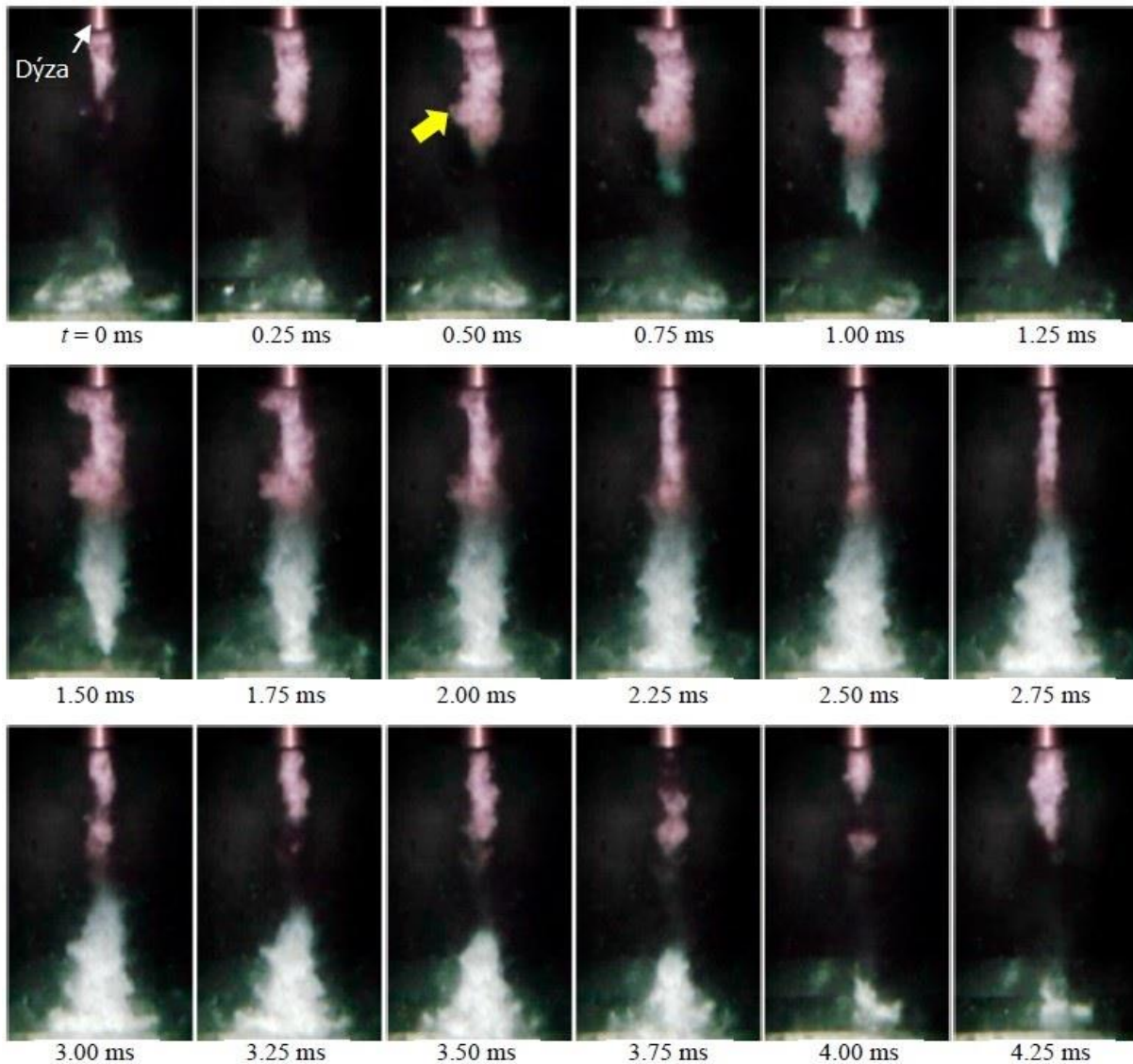
V oboch prípadoch je priebeh experimentu rovnaký. Vzorka je vystavená kavitácii určitý časový úsek. Potom sa vzorka zo zariadenia vyberie, odmeria sa strata materiálu a vloží do stroja. Cyklus sa následne zopakuje. Výsledkom je diagram, zobrazujúci závislosť úbytku materiálu na čase.

Nevýhodou tejto experimentálnej metódy je, že generovaná kavitácia nedokáže simulovať reálne podmienky, vyskytujúce sa v praxi. Nezahrňuje vplyv prúdenia na kvapalinu ani náhodnú frekvenciu jednotlivých implózií.

### 3.3. Kavitačné trysky (ASTM G134-17) [1]

Táto metóda testovania kavitačnej odolnosti je popísaná normou ASTM G134-17. Kavitácia je v stroji generovaná na rozhraní rýchlo sa pohybujúceho prúdu kvapaliny a statického okolitého média vďaka silným turbulentným prúdom. Kavitačné bubliny sú v kvapaline rozmiestnené náhodne aj keď je možné ich organizovať úpravami použitej trysky. Hovoríme o neštruktúrovaných a štruktúrovaných kavitačných prúdoch. [1]

Hoci je prúd do média, vstrekovany kontinuálne, kavitačný oblak, tvoriaci sa v blízkosti trysky, nie je unášaný plynulo, ale postupne sa akumuluje a odtrháva sa až neskôr. Periodicky sa tak mení hustota kavitačných bublín, implodujúcich v blízkosti povrchu sledovanej vzorky. Na obrázku 16 je kavitačný oblak označený žltou šípkou. Je možné pozorovať, že oblak sa pohybuje pomaly relatívne k rýchlosti prúdiacej vody z trysky. Tryskový prúd, obklopený väčším kavitačným oblakom, naráža na povrch vzorky vyššou rýchlosťou z dôvodu menšieho odporu okolitého média. Je dokázané, že čím dlhšiu životnosť kavitačný oblak má, tým je jeho výsledný efekt na povrch vzorky intenzívnejší.



Obr. 16 Postupná akumulácia a odtrhnutie kavitačného oblaku. Priemer trysky 2 mm, tlak na výstupe 30 MPa, vzdialenosť trysky od vzorky je 222 mm

Na obrázku 17 je možné pozorovať hliníkovú vzorku vystavenú kavitačnému prúdu, odhaľujúcu plastickú deformáciu prstencového tvaru, spôsobenú kavitáciou. Vonkajší priemer zasiahnutej oblasti je 60 mm a vnútorný priemer 30 mm. Priemer dýzy bol 2 mm a zasiahnutá oblasť bola tridsaťkrát širšia.



Obr. 17 Typický tvar ovplyvnenej oblasti

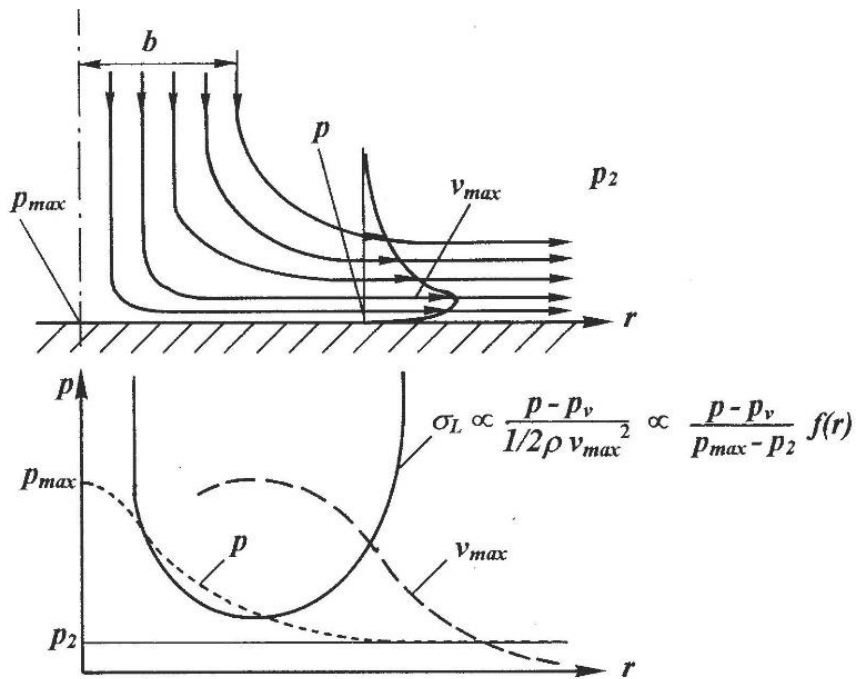
Kavitačné číslo je pre tento systém možné definovať len pomocou pomeru tlakov. Rovnica (13) slúži tomuto účelu. Neznáma  $p_2$  označuje tlak v okolí kavitačného prúdu,  $p_1$  je označenie tlaku na výstupe dýzy a  $p_v$  označujeme tlak nasýtených pár.

$$\sigma = \frac{p_2 - p_v}{p_1 - p_2} \approx \frac{p_2}{p_1} \quad (13)$$

Lokálne kavitačné číslo  $\sigma_L$  je možné vypočítať pomocou úpravy rovnice (3), výsledkom čoho je rovnica (14):

$$\sigma_L \propto \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{max}^2} \propto \frac{p - p_v}{p_{max} - p_2} f(r) \quad (14)$$

Neznáme  $p$  a  $v_{max}$  označujú tlak a maximálnu rýchlosť prúdenia na povrchu vzorky. Rýchlosť  $v_{max}$  je dosiahnutá v určitej vzdialenosti ( $r$ ) od stredu trysky a je určená tlakovým rozdielom  $p_{max} - p_2$ . Lokálne kavitačné číslo  $\sigma_L$  je tak popísané funkciou  $f(r)$ . Keď sa kavitačný oblak zrúti na povrch vzorky, rozvinie sa v oblasti  $\frac{\partial \sigma_L}{\partial r} < 0$ , a zrúti sa ak  $\frac{\partial \sigma_L}{\partial r} \approx 0$ . Preto sa kavitačne ovplyvnená oblasť redukuje na tvar zobrazený na Obr. 17.



Obr. 18 Schematické zobrazenie lokálneho kavitačného čísla

Ako bolo spomenuté v predchádzajúcich odsekoch, kavitačné oblaky sa odtrhávajú periodicky a vytvárajú prstence vírovej kavitácie, ktoré periodicky implodujú v blízkosti povrchu vzorky. Experimentálne je možné určiť závislosť frekvencie odtrhávania kavitačného oblaku. Nasledujúce rovnice ukazujú závislosť frekvencie od tlaku (15), kavitačného čísla (17) a priemeru dýzy (16).

$$f_c \propto p_1^{0,45 \pm 0,03} \quad (15)$$

$$f_c \propto d^{-0,98 \pm 0,14} \quad (16)$$

$$f_c \propto \sigma^{0,83 \pm 0,1} \quad (17)$$

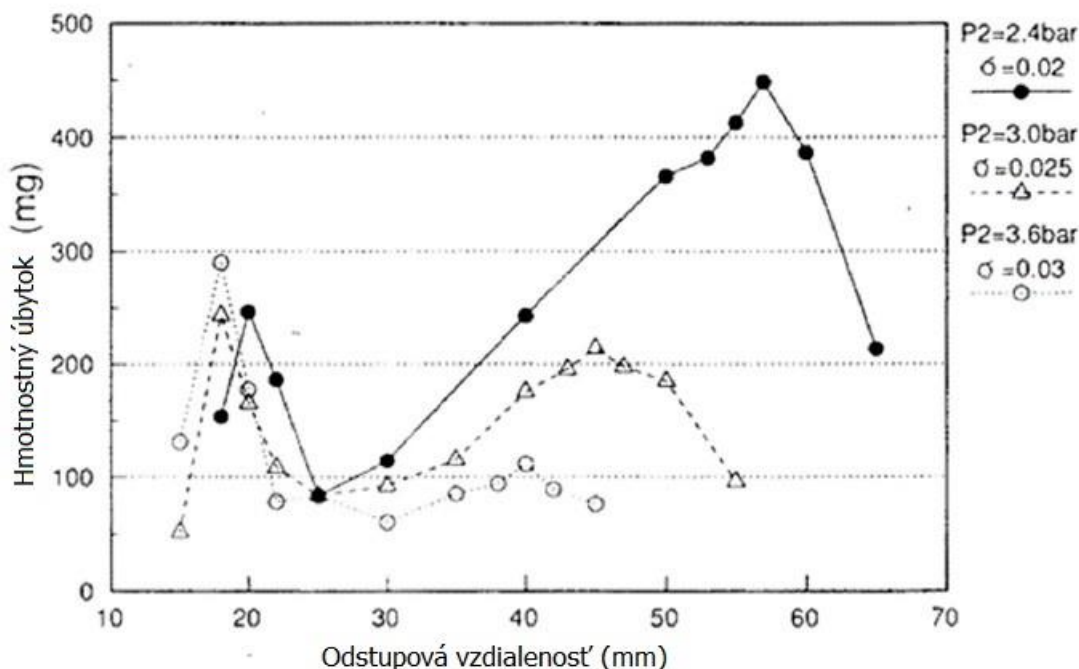
## 4. Základné parametre kavitačnej trysky [9]

oKavitačným prúdom rozumieme ponorený, vysokorýchlostný prúd kvapaliny v ktorého vzniká kavitácia. Kavitačný prúd je možné vytvoriť aj bez obklopujúceho média. V takom prípade hovoríme o kavitačnom prúde na vzduchu, ktorý nepotrebuje na svoje fungovanie nádrž s kvapalinou. Základom tejto technológie je vstrekovanie vysokorýchlostného prúdu kvapaliny do prúdu s nižšou rýchlosťou a tlakom média.

Meranie reziduálneho vnútorného napätia v materiáli po skúške, ukázalo rozdiel vo výslednom efekte na materiál. Použitím ponoreného kavitačného prúdu bolo reziduálne napätie v materiáli hlbšie pod povrchom, než v prípade kavitačného prúdu na vzduchu. Keďže práca sa zaoberá ponoreným kavitujúcim prúdom, nebudeme sa ďalej zaoberať vplyvom rôznych parametrov, ovplyvňujúcich správanie neponoreného prúdu.

### 4.1. Vzďialenosť od vzorky

Kavitácia vzniká v okolí dýzy, kde sa akumuluje a odtrháva kavitačný oblak, ktorý ma prstencový tvar a imploduje v blízkosti vzorky. Z praktického pohľadu je zrejmé, že mechanizmus kavitačného prúdu závisí od vzdialenosti dýzy od meranej vzorky. Obrázok 19 zobrazuje hmotnostnú stratu, ako funkciu vzdialenosti pri konštantnom vstrekovacom tlaku 120 barov pre rôzne kavitačné čísla. Je možné si všimnúť, že s rastúcou vzdialenosťou od vzorky sa vykresľujú dva vrcholy. Prvý vrchol (vľavo) je výsledkom impaktu vysokotlakového prúdu generovaného zariadením. Mechanizmus je podobný ako pri technológii rezania vodným lúčom. Druhý vrchol (vpravo) vzniká následkom kavitačnej erózie.

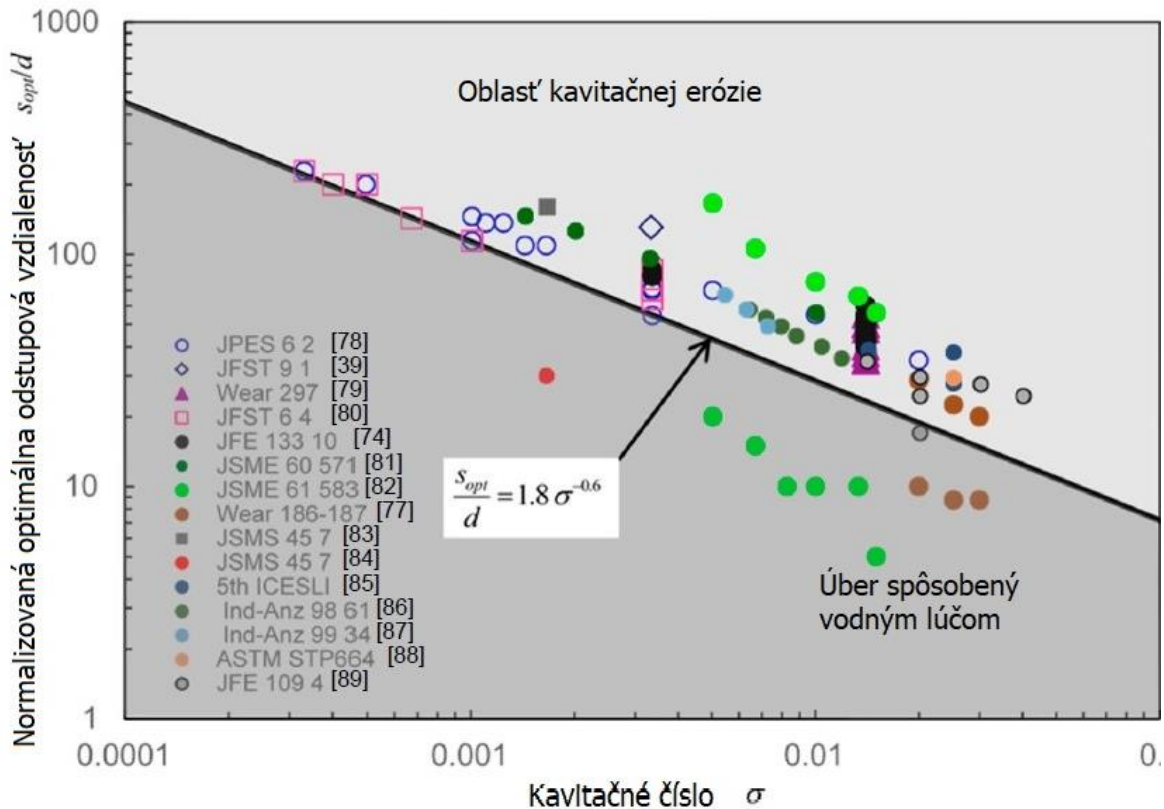


Obr. 19 Závislosť vzdialenosti a hmotnostnej straty pre rôzne kavitačné čísla

Pre lepšiu prehľadnosť a jednoduchšie rozlíšenie dôvodu úberu materiálu, bola vytvorená mapa (Obr. 20) na rozlíšenie dôvodu úberu. Základným sledovaným parametrom je kavitačné číslo a vzdialenosť. Rovnicou (18) je popísaná priamka, oddeľujúca tieto dva režimy.

Jednoduchým overením správnej vzdialenosti dýzy od vzorky je pozorovanie charakteristického prstencovitého tvaru na povrchu (viď. Obr. 17).

$$\frac{s_{opt}}{d} = 1,8\sigma^{-0,6} \quad (18)$$



Obr. 20 Klasifikačná mapa

## 4.2. Kavitačné číslo

Kavitačné číslo je dôležitým parametrom pri popise kavitačnej trysky. Na obrázku 21 je zobrazená závislosť kavitačného čísla na optimálnej, odstupovej vzdialenosti dýzy od vzorky. Na obrázku 21 je tiež pridaná kavitačná dĺžka. Dĺžka a odstupová vzdialenosť sú normalizované efektívnym priemerom trysky  $D_e$ , ktorý je definovaný priemerom hrdla trysky a koeficientom vypúšťania.

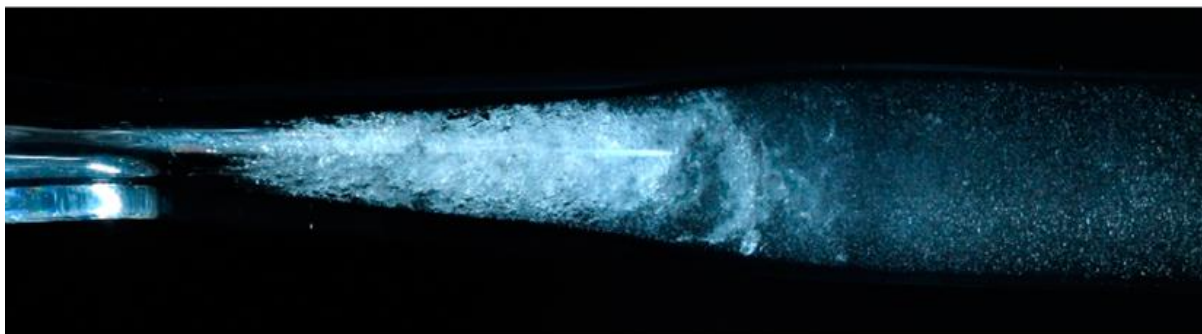
$$\frac{s_{opt}}{d} = c_1\sigma^{-c_2} \quad (19)$$

Rovnica (19) je obecným tvarom rovnice (18), kde koeficienty  $c_1$  a  $c_2$  sú závislé na geometrii trysky.

## 4.3. Rýchlosť zvuku

Za účelom experimentálneho zváženia kľúčových faktorov, pri dopadoch kavitácie vyvolaných kavitačným prúdom, bola skúmaná rýchlosť zvuku v oblasti kavitačného prúdenia. Keď sa rýchlosť erózie zvyšuje s akustickou impedanciou, vplyv kavitácie sa môže zvyšovať s rýchlosťou zvuku v kavitačnom prúdovom poli. Neexistuje však žiadny príklad merania rýchlosti zvuku v samotnej kavitačnej oblasti. Rýchlosť zvuku v okolí kavitujúceho objemu je

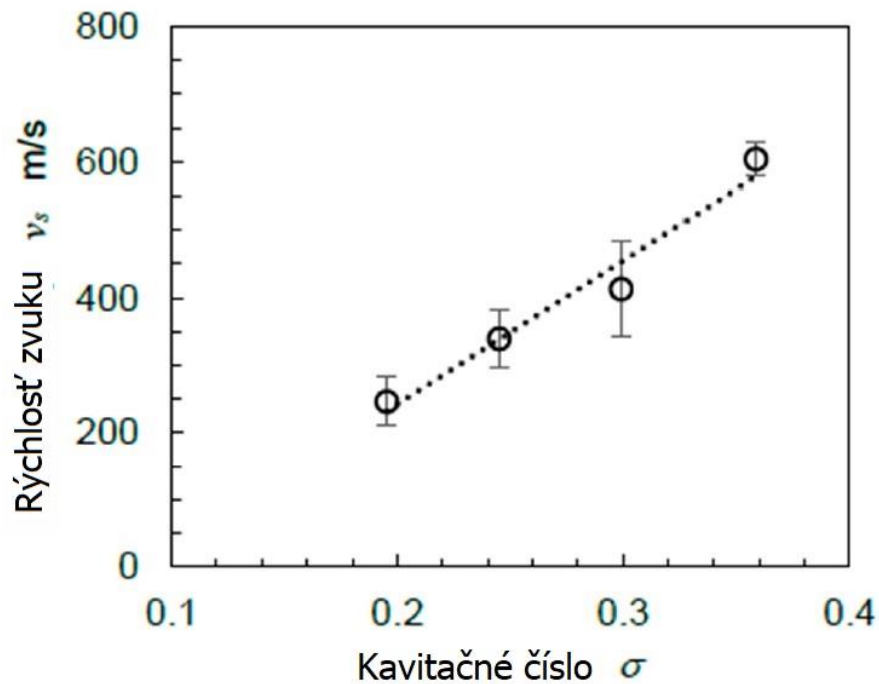
možné merať napríklad vo Venturiho trubici. Na obrázku 22 je zobrazená Venturiho trubica, v ktorej sa odtrháva prúd a vzniká kavitácia. Ďalej po prúde od kavitačného oblaku (napravo) je možné pozorovať veľa malých bublín, ktoré predstavujú zvyškové bubliny po zrútení kavit. Ako je znázornené na obrázku 16, hustota zvyškových bublín sa mení v objeme. Rozdiel v hustote rozloženia týchto bublín má na svedomí postupujúca akustická vlna, ktorú je možné zachytiť vysokorýchlostnou kamerou.



Obr. 211 Vírová kavitácia pozorovaná vo Venturiho trubici. Postupujúca tlaková vlna je zreteľne viditeľná ako oblasť s nižšou hustotou bublín za kavitačným oblakom

V experimente mal vstupný tlak hodnotu 0,6 MPa a pomer plochy prierezu medzi hrdlom a trubicou bol 9. Z uvedeného vyplýva, že rýchlosť prúdenia v smere prúdenia za hrdlom bola asi  $3,5 \text{ ms}^{-1}$ . Na druhej strane rýchlosť pohybu tlakovej vlny bola viac ako  $600 \text{ ms}^{-1}$ . Je dokázané, že akustická vlna je vytvorená ako dôsledok implózie kavitačného oblaku. Tlaková vlna je pozorovateľná vďaka silovým účinkom kvapaliny na unášané bubliny, ktoré pod vplyvom tlaku zmenšia svoj polomer.

Obrázok 22 ilustruje vzťah medzi kavitačným číslom a rýchlosťou zvuku. Rýchlosť zvuku rastie s kavitačným číslom. Pri znižujúcej sa hustote bublín sa rýchlosť zvuku zvyšuje. Rýchlosť erózie sa zvyšovala s akustickou impedanciou a akustická impedancia sa vyjadruje ako súčin rýchlosti zvuku, hustoty a rýchlosti micro jet-u, teda rýchlosť zvuku v oblasti kavitačného prúdenia je parametrom kavitačného lúča. Tento výsledok naznačuje, že zvýšenie rýchlosti zvuku je jedným z dôvodov, prečo sa agresivita kavitačného lúča zvyšuje so zvyšujúcou mierou kavitácie. Na druhej strane agresivita kavitačného prúdu klesá so zvyšujúcim sa kavitačným číslom. Tieto dve protichodné tendencie majú za následok to, že agresivita kavitačného lúča dosahuje vrchol pri  $\sigma = 0,01 - 0,014$ .



Obr. 22 Závislosť rýchlosti zvuku na kavitačnom čísle. Merané na Venturiho trubici.

#### 4.4. Geometria dýzy

Najdôležitejším faktorom dýz je priemer trysky. Kavitácia v zariadení je generovaná vírovými štruktúrami. Reynoldsove číslo, ktoré je základom popisu vírivého prúdenia, je dôležitým sledovaným parametrom. Vyššie rýchlosti a väčšie priemery trysiek sú vhodnejšie na generáciu kavitácie. Naopak, príliš vysoké rýchlosti (vstrekovacie tlaky) znižujú agresivitu erózie. Preto, z dôvodu praktickej aplikácie, je vhodnejšie používať dýzy s relatívne veľkým priemerom trysky a nízkym vstrekovacím tlakom.

## 5. Testovacia stolica

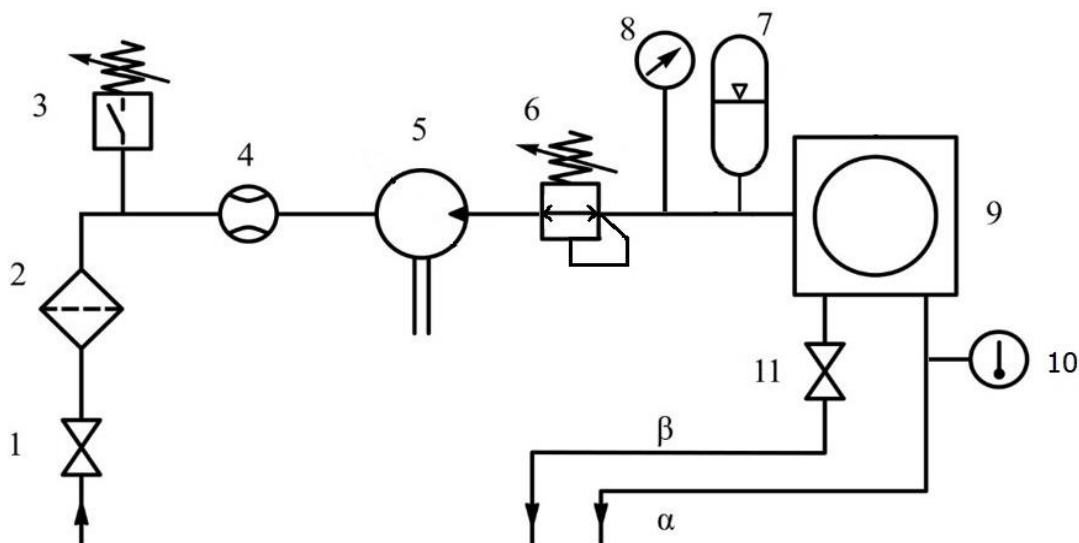
Testovanie kavitačnej odolnosti materiálov pomocou kavitačnej trysky sa vykonáva v zariadeniach, určených pre túto aplikáciu. Základom je testovacia komora, v ktorej prebieha samotný test. Ide o komoru s otvorenou alebo uzavretou vodnou hladinou. Obe tieto riešenia majú svoje výhody a nevýhody.

V uzavretej komore je možné meniť tlak média, tak meniť kavitačné číslo. Tento prístup je vhodné využiť, ak je dôvodom experimentu napríklad testovanie efektívnosti rôznych tvarov a rozmerov dýz. Vo všeobecnosti, ak je potrebné zachovať kavitačné číslo pre rôzne parametre dodávaného tlakového média. Nevýhodou je vyššia komplexnosť testovacieho zariadenia.

Komora s otvorenou hladinou rieši problém s komplexnosťou zariadenia. Nevýhodou je, že tlak v okolí testovanej vzorky je možné meniť len pomocou výšky vodného stĺpca. V tomto prípade je zariadenie limitované svojimi rozmermi. Keďže je značný nepomer medzi okolitým a vstrekovacím tlakom trysky, bola by výška vodného stĺpca, potrebná na výraznejšiu zmenu tlaku, a tým pádom na reguláciu kavitačného čísla, mnohonásobne preyšujúca praktické rozmery zariadenia. Preto sa pre toto konštrukčné riešenie navrhuje dostatočujúca hĺbka ponoru vzorky tak, aby nedošlo k prípadnému nasávaniu atmosféry do okolia trysky. Kvôli tomu sa vo výpočtoch kavitačného čísla uvádza tlak zhodný s atmosférickým. Komora s otvorenou hladinou je vhodná pre experimenty, ktorých hlavnou úlohou je vyhodnocovať rôzne režimy a u ktorých sa počíta so zmenou kavitačného čísla.

Tlakové médium, potrebné pre vytvorenie kavitačného lúča je dodávané čerpadlom Interpump Evolution 2 E2B2014 s výkonom 5,37 kW a maximálnym výstupným tlakom 20 MPa. Čerpadlo je schopné dodávať 230-400 lmin<sup>-1</sup>. Príkion čerpadlu dodáva trojfázový štvorpólový asynchrónny elektromotor Mazzoni MEC 112 s výkonom 5,5kW a otáčkami 1450.

Zapojenie okruhu testovacej stolice, schematicky znázornené na obrázku 2, zobrazuje zjednodušené zapojenie testovacej stolice.

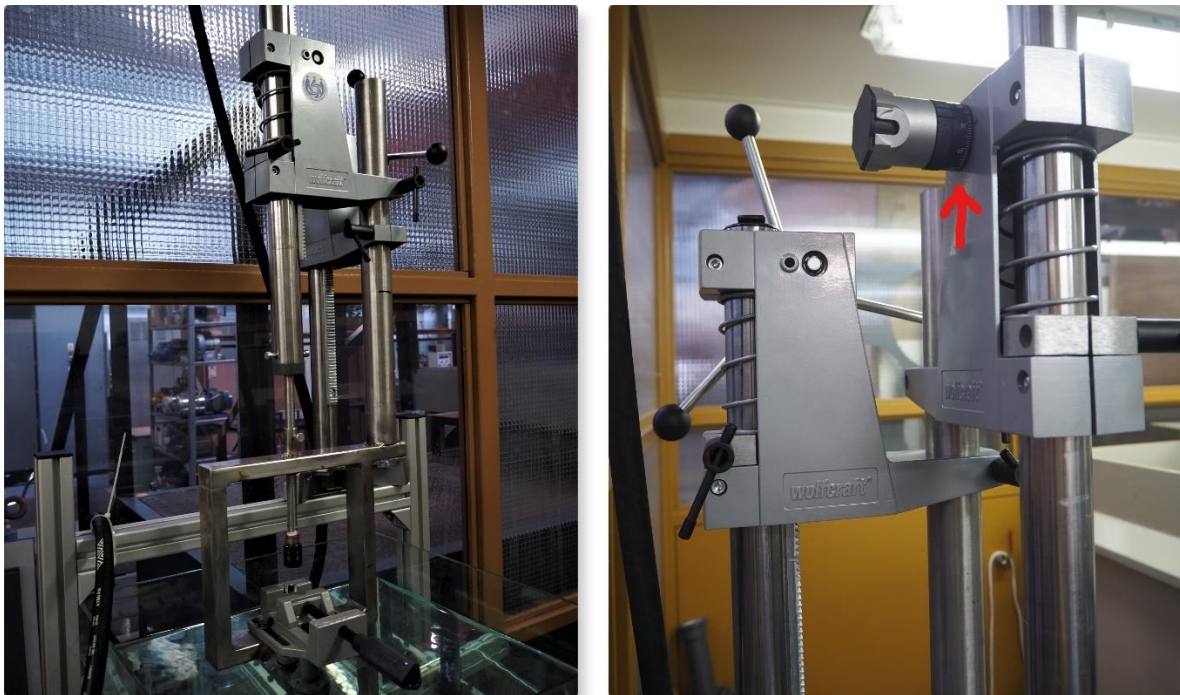


Obr. 233 (1) uzatvárací ventil, (2) filter pevných častíc, (3) tlakový spínač, (4) prietokomer, (5) čerpadlo, (6) redukčný ventil (7) hydraulický akumulátor/vzdušník, (8) tlakomer, (9) testovacia komora, (10) teplomer, (11) uzatvárací ventil

Ventil (1) na vstupu slouží na otevření/uzavření přívodu vody do systému. Voda je do systému, v tomto štádiu projektu, dodávána z externího zdroje pod tlakem (například vodovodu). Prechází skrz filter (2), kde se z vody odstraňují nečistoty. Tlakový spínač (3) slouží jako poistka pro čerpadlo. Ak nie je v systéme dostatočný tlak, čerpadlo nie je možné spustiť. Týmto spôsobom sa predchádza havarijnemu stavu, ktorý by nastal, ak by sa čerpadlo spustilo nasucho. Za čerpadlom (5) sa nachádza redukčný ventil (6), snímač tlaku (8) a hydraulický akumulátor (7). Redukčný ventil slouží na regulaci tlaku, dodávaného kavitacej trysky a tlakomer (8) na odčítanie hodnoty dodávaného tlaku. Funkciou akumulátora je tlmenie tlakových vibrácií v kvapaline. Teploměr na výstupe testovacej komory (10) slouží na meranie teploty média v komore (9). Výpuste ( $\alpha$  a  $\beta$ ) majú 2 rôzne využitia. Úlohou výpuste  $\alpha$  je udržiavať stabilnú výšku hladiny v testovacej komore a plní funkciu prepadu. Potrubie ( $\beta$ ) s ventilom (11) je určené len pre údržbu a slouží na vypustenie testovacej komory.

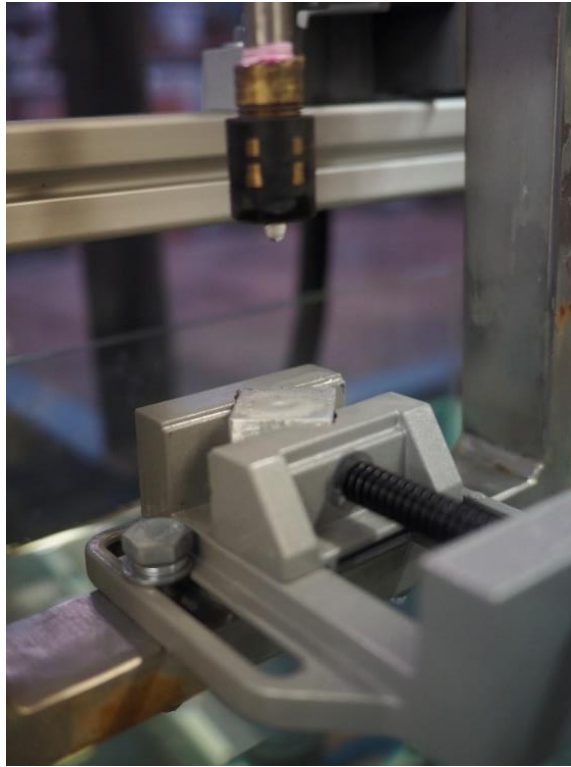
Pri návrhu testovacej komory sa dbalo na jednoduchosť, nízku cenu a ergonómiu. Preto pozostáva z väčšej časti z nakupovaných dielov. Samotná testovacia komora s rozmermi 500x500x500 je vyrobená zo skla a je osadená na rámovej konštrukcii s hliníkových profilov 40x40. Rám s výškou 730 mm je postavený na štyroch otočných kolieskach a jeho pôdorys má rozmery 560x790 mm. Pod ním sa nachádza samotné čerpadlo a jeho pridružené komponenty popísané vyššie, ktoré sú uložené vo vlastnej kletke.

Mechanizmus na nastavenie hĺbky ponoru a odstupovej vzdialenosti (Obr. 24) je upevnený na portáli. Mechanizmus pozostáva z dvoch sériovo zapojených statívov vrtáčky, ktoré sú osadené nóniusmi (červená šípka). Lineárny pohyb je zabezpečený hrebeňovým prevodom a je poistený trojicou skrutkových spojov. Výška dýzy je dodatočne poistená štvrtou skrutkou. Mechanizmus je skonštruovaný tak, aby dovoľoval vynorenie vzorky s celým upínacím mechanizmom, bez zmeny odstupovej vzdialenosti dýzy od vzorky.



Obr. 24 Mechanizmus na nastavenie hĺbky ponoru (vľavo) a odstupovej vzdialenosti (vpravo)

Upevnenie vzorky v testovacej komore je realizované zverákom. Ten je spolu aj so vzorkou utopený pod hladinou v ráme (Obr. 25). Zverák má z dôvodu presnosti upevnenia v čeľustiach vyfrézované drážky, v ktorých sa vzorka usadí s vysokou presnosťou.



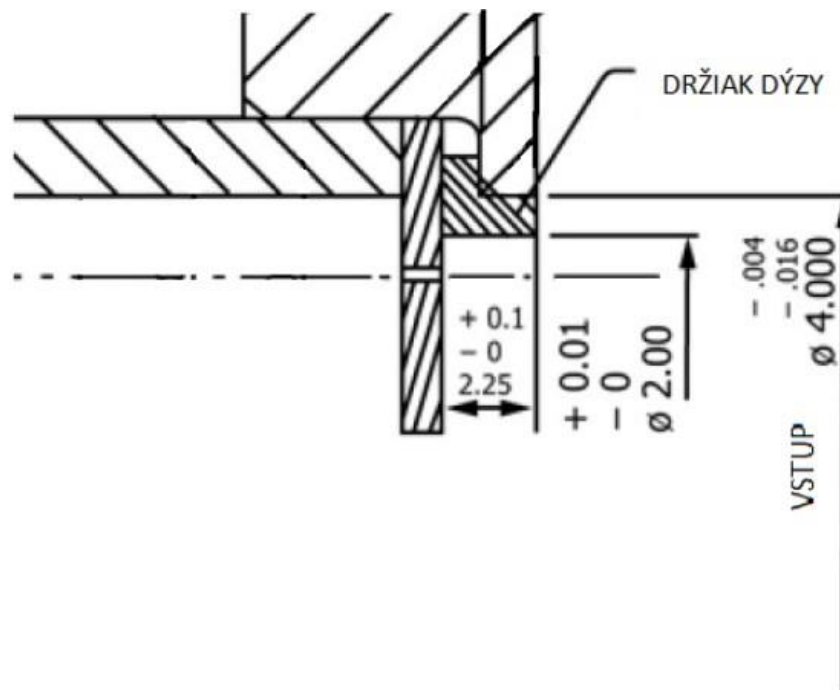
Obr. 25 Upevnenie vzorky v testovacej komore

Zapínanie stroja je z dôvodu presnosti a jednoduchosti riadené časovačom. Manuálnym zopnutím spínača časovaču sa spustí elektromotor poháňajúci čerpadlo a spustí sa odpočet. Po čase sa elektromotor automaticky odpojí a experiment sa ukončí.

## 6. Experiment

Kavitácia spôsobuje v hydraulických zariadeniach agresívnu kavitačnú eróziu. Mieru erózie je dôležité merať, z dôvodu vyhodnocovania kavitačnej odolnosti materiálu. Existujú dve medzinárodne štandardizované metódy testovania kavitačnej odolnosti. ASTM G32 spočíva v generácii kavít pomocou akustických vibrácií. Druhou metódou, ktorou sa zaoberá táto práca, je ASTM G134-17. Obe tieto metódy sú popísané v kapitole 3.

Z dôvodu validity a reprodukovateľnosti norma ASTM G134-17 predpisuje základné špecifikácie použitého testovacieho zariadenia a vlastnosti vzorky. Zariadenie popísané v norme používa uzatvorenú komoru, s regulovateľným vstrekovacím tlakom a tlakom v komore, nie je to však nutnosť. Použitá dýza je jednoduchej konštrukcie s valcovou dierou s hĺbkou rovnou trojnásobku priemeru dýzy. Ideálne by mala byť vyrobená z koroziivzdorného materiálu, s vysokou odolnosťou voči erózii. Tvar držiaku dýzy výrazne ovplyvňuje výkonnosť dýzy. Špecifikácie a rozmery dýzy sú zobrazené na obrázku 25.

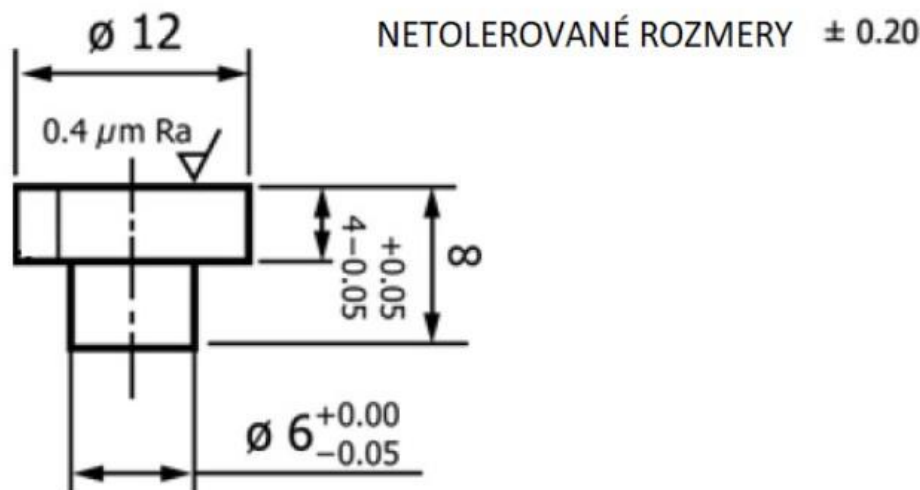


Obr. 25 Rozmery dýzy [10]

Vzorka je v zariadení upevnená zverákom a je umiestnená koaxiálne s tryskou. Testovaná plocha by mala byť kolmá na osu dýzy s toleranciou kolmosti 0,02mm. Ak nie je požadované vykonávať experiment na povrchu s predpísanou drsnosťou, tak vzorku je odporúčané brúsiť na hodnotu Ra 0,4  $\mu$ m. Pre niektoré materiály je postačujúce opracovanie tretinovým posuvom a tretinovým prísuvom oproti optimálnym rezným podmienkam. [10]

Testovanie vyšším vstrekovacím tlakom pri zachovaní kavitačného čísla a odstupovej vzdialenosti má za následok vyššiu rýchlosť erózie. Rýchlosť kavitačnej erózie je v tomto prípade proporcionálna so vzťahom  $(p_2)^n$  kde  $n$  je približne rovné 4. Hodnota neznámej  $n$  je ovplyvnená použitým zariadením a kavitačným číslom. Vysoký vstrekovací tlak je možné použiť v prípade testovania vysoko odolných materiálov z dôvodu časovej náročnosti

experimentu. V opačnom prípade, ak sa testuje menej odolný materiál, je vhodné tlak  $p_2$  znížiť z dôvodu presnosti experimentu. Príkladom môže byť testovanie povlakov s vysokou rezistenciou voči kavitačnej erózii, ktoré majú tendenciu sa odlupovať, skokovo tak narastá rýchlosť erózie a meraním tak nie je možné zachytiť samotnú odolnosť povlaku.

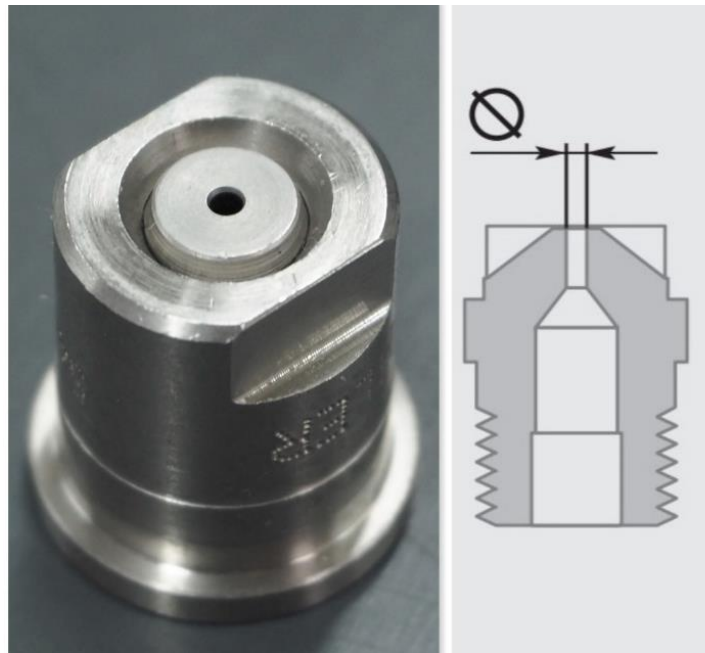


Obr. 26 Náčrt vzorky [10]

Časový krok nie je možné jednoducho definovať. Rýchlosť erózie je silne závislá na faktoroch ako vstrekovací tlak, geometria dýzy, odstupová vzdialenosť a na mechanických vlastnostiach testovaného materiálu. Preto nie je možné časový krok, potrebný na vykreslenie krivky závislosti rýchlosti erózie na čase, určiť dopredu.

Cieľom práce je určiť závislosť vplyvu počiatočných podmienok na celkovú mieru kavitačnej erózie. Pre tento experiment sme použili dýzu s označením 1/4" M NPT 04 (Obr. 27). Táto dýza má s rozstrekovým uhlom  $0^\circ$  má priemer dýzy  $d = 1,21 \text{ mm}$ . Jedným zo základných sledovaných parametrov kavitačných trysiek je kavitačné číslo, ktoré sa počíta z rovnice (13) ako pomer medzi tlakom média a vstrekovacím tlakom dýzy. Pre tento experiment boli zvolené 3 rôzne vstupné tlaky s hodnotami  $p_1 = 9; 13,2; 18 \text{ MPa}$  ktoré zodpovedajú kavitačnému číslu  $\sigma = 0,011; 0,0074; 0,0055$ . Druhou premennou bola vzdialenosť dýzy od testovacej vzorky, ktorá bola zvolená s hodnotami  $s_{off} = 10; 30; 60 \text{ mm}$ . Vzorky boli vybrané z materiálu ALCu4Mg1Mn1, ktorý je zliatinou hliníka a medi s obsahom medi 4,5-3,8%. Tento dural s vysokými hodnotami statickej a únavovej pevnosti je určený pre dynamicky namáhané konštrukcie, medzi kĺzu v nevytvrdenom stave má 160 MPa a po vytvrdzovaní môže dosahovať hodnoty až 325 MPa. Vzorka má tvar nízkeho kvádra so štvorcovou podstavou a celkové rozmery vzorky sú 30x30x10 mm. Hrúbka však nie je z dôvodu nepresnosti prípravy konštantná, a preto majú vzorky rozdielne hmotnosti. Drsnosť plochy, vystavenej kavitačnému lúču, je odhadnutá na  $Ra 3,2 \mu\text{m}$ .

Časový krok pre jednotlivé pracovné body nie je konštantný a mení sa v závislosti na odozve materiálu počas testu. Jednotlivé pracovné body tak pracujú s rozdielnym časovým krokom, vhodným pre zvolené parametre pracovného bodu.



Obr. 27 Dýza 1/4" M NPT 04

## 6.1. Postup experimentu

Dôležitým aspektom pri vyhodnocovaní výsledkov experimentu je katalogizácia. Preto bol navrhnutý systém poradových čísel jednotlivých vzoriek podľa tabuľky 1.

Tabuľka 1 Označovanie pracovných bodov

		Odstupová vzdialenosť $s_{off}$ [mm]		
		10	30	60
Vstrekovací	90	1	2	3
Tlak	135	4	5	6
$p_2$ [bar]	180	7	8	9

Hliníková vzorka sa označí poradovým číslom a odváži. Hmotnosť sa zapíše do tabuľky. Po týchto úkonoch sa vzorka vloží do zariadenia, kde sa upevní do zveráku. Odstupová vzdialenosť je nastavená tak, že po upevnení vzorky sa dýza spustí dole a dotkne sa vzorky. Nónius sa vynuluje a následne sa dýza zdvihne na požadovanú odstupovú vzdialenosť, predpísanú experimentom. Výška dýzy sa zaaretuje skrutkami a následne sa upevňovací mechanizmus spustí pod hladinu.

Po nastavení časového kroku časovačom, sa zariadenie spustí, nastaví sa požadovaný tlak a zapne sa odpočet. Po uplynutí doby experimentu sa zariadenie automaticky odstaví a experiment sa ukončí. Vzorka sa následne zo zariadenia vyberie, nechá vyschnúť, zváži sa a vyfotografuje. Týmto postupom pokračujeme pre všetky časové kroky, potrebné pre vyhodnotenie pracovného bodu.

Výsledkom experimentu sú grafy zobrazujúce závislosti úbytku materiálu na kavitačnom čísle, odstupovej vzdialenosti a dobe experimentu. Posledným sledovaným grafom je závislosť rýchlosti erózie na dobe trvania experimentu. [11]

Výkon vodného lúča je veličina vhodná pre kvantifikáciu a popis kavitačnej trysky. Rovnica (20) definuje energiu prietokom  $Q$  a tlakovým rozdielom  $\Delta p$ . Prípadne podľa zápisu (20') je výkon definovaný priemerom dýzy tlakovým rozdielom a vstrekovacím koeficientom  $C_d$ , ktorý je možné vypočítať zo vzťahu (21). [11]

$$P = Q\Delta p \quad (20)$$

$$P = \frac{\pi d^2}{4} C_d \sqrt{\Delta p^{1,5} \frac{2}{\rho}} \quad (20')$$

$$C_d = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}} \quad (21)$$

Tabuľka 2 zobrazuje vypočítané hodnoty  $C_d$ ,  $P$  a optimálnej odstupovej vzdialenosti  $s_{opt}$ , vypočítanej rovnicou (18). Hodnota prietoku bola získaná meraním na diele počas experimentu. Z praxe sa zistilo, že počas postupného opotrebovávania dýzy sa prietok znižoval oproti tabuľkovým hodnotám v katalógu. Dôvod paradoxného znižovania prietoku nebolo možné vysvetliť a výrobca na to tiež nemal jednoznačnú odpoveď. Preto sa prietok dýzou sledoval a vo výpočtoch sa použili namerané hodnoty. Zároveň sa prietokom kontrolovalo opotrebenie dýzy. V prípade značného opotrebenia by bola dýza vymenená. Ide však o pomalý proces a počas priebehu experimentu nebola výmena nutná. V prípade testov vysoko odolných materiálov je však nutné opotrebenie dýzy sledovať.

Tabuľka 2 charakteristické hodnoty kavitačného lúča pre jednotlivé vstrekovacie tlaky

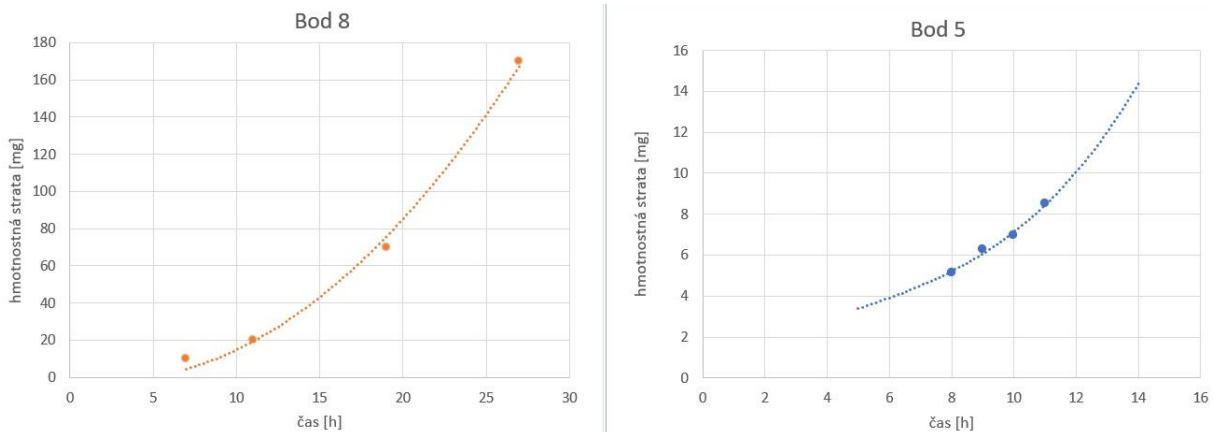
		Prietok $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	Kavitačné číslo	Odstupová vzdialenosť $s_{opt}$ [mm]	Vstrekovací koeficient $C_d$	Výkon lúča $P$ [W]
Vstrekovací tlak $p_2$ [bar]	90	0.00014	0.011111	32.4	0.9281	1290
	135	0.00018	0.007407	41.3	0.9253	2362.5
	180	0.00021	0.005556	49.1	0.9539	3750

Na agresivitu kavitácie a efektívitu tvorby kavít vplývajú aj parametre použitého média. A to hlavne teplota média podľa ktorej sa mení tlak sýtych pár  $p_v$  (1) a množstvo nerozpusteného plynu. Teplota použitej vody sa počas celej doby experimentu pohybovala na hodnote 5,8 °C. Použitá voda by mala byť podľa normy [10] „odležaná“, dôvodom je potreba znížiť koncentráciu nerozpusteného kyslíku v kvapaline, ktorý nepriaznivo vplýva na agresivitu kavitácie. To je však možné zabezpečiť iba v uzatvorenom okruhu. Zariadenie použité v tejto práci je konštruované pre otvorené okruhy. Preto bol vykonaný test na prítomnosť kyslíku v kvapaline. Zistilo sa, že v kavitačnej komore je obsah nerozpusteného kyslíku na hodnote 7,55 mg/l. V prípade napájacej vody bola táto hodnota 8,25 mg/l.

## 7. Výsledky experimentu

### 7.1. Grafy a tabulky (bod 5, 8)

Kvůli nelineární povaze krivky miery erózie a času je potrebné pri porovnávaní a vyvodzovaní záverov brať do úvahy tvar tejto krivky a aj iné parametre. Jednoduché porovnanie kumulatívnej straty hmotnosti v čase pre všetky pracovné body neposkytne spoľahlivé porovnanie. [10]



Obr. 27 Závislosť kumulatívnej straty hmotnosti na čase

Obrázok 27 zobrazuje grafy priebehu straty hmotnosti závislej na čase pre body 5 a 8. Prvý bod grafu pre piaty pracovný bod (vpravo), bol zaznamenaný po ôsmich hodinách prevádzky zariadenia, následne sa časový krok skrátil na jednu hodinu a experiment pokračoval. Celkový čas experimentu bol 11 hodín a úbytok materiálu za dobu experimentu bol  $\Delta m_5 = 8,5 \text{ mg}$ .

Pre bod 8 (vľavo) platí, že prvé meranie prebehlo po siedmich hodinách a druhé po jedenástich, následne sa časový krok predĺžil na 8 hodín. Celkovo boli zaznamenané 4 body. Za dobu experimentu bol vzorke odobraný materiál s celkovou hmotnosťou  $\Delta m_8 = 170 \text{ mg}$ . V čase 11 hodín bol úbytok hmotnosti 20 mg.

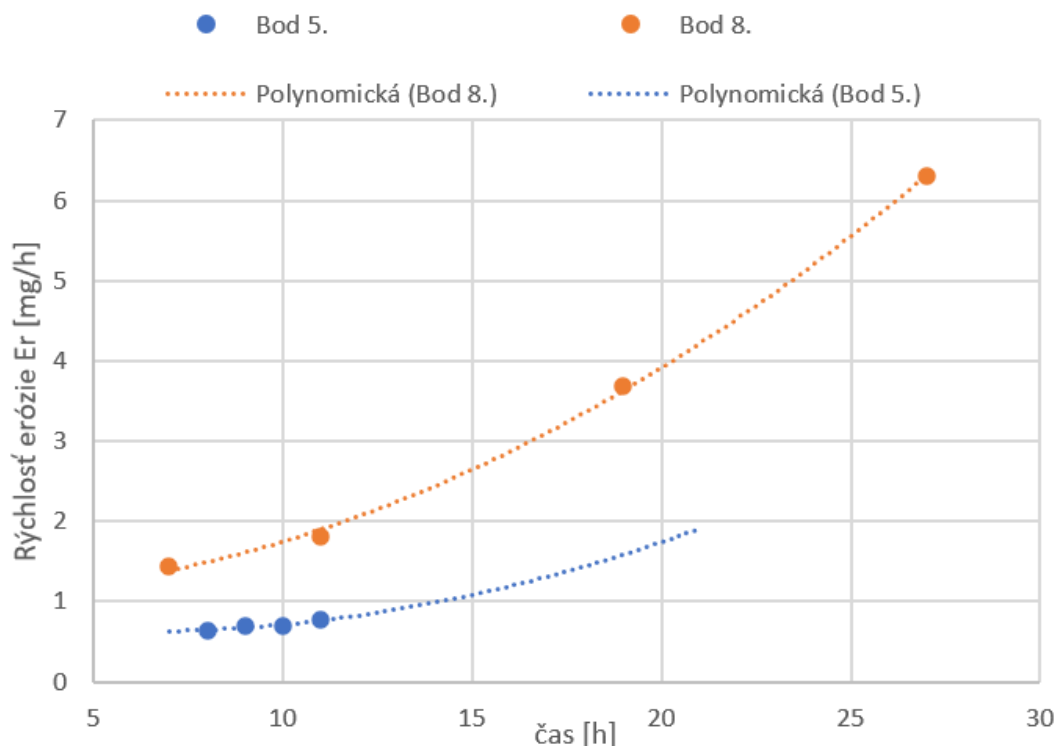
Tabuľka 3 Namerané hodnoty hmotnosti pre pracovný bod 8

		m [g]	dm [mg]	rýchlosť erózie [mg/h]
čas [h]	7	24.96	10	1.428571
	11	24.95	20	1.818182
	19	24.9	70	3.684211
	27	24.8	170	6.296296
počiatočná hmotnosť $m_0$ [g]		25.458		

Tabuľka 4 Namerané hodnoty hmotnosti pre pracovný bod 5

		m [g]	dm [mg]	rýchlosť erózie [mg/h]
čas [h]	8	25.45287	5.133333	0.641667
	9	25.45173	6.266667	0.696296
	10	25.45105	6.95	0.695
	11	25.4495	8.5	0.772727
počiatočná hmotnosť $m_0$ [g]		25.458		

Graf závislosti rýchlosti erózie na čase (Obr. 28) zobrazuje bod 5 a 8 v kontexte. Je známe, že rýchlosť erózie sa mení v závislosti na stave materiálu a dĺžke vystavenia kavitačnej erózi. Kavitačná erózia prechádza štyrmi fázami. Sú to inkubácia, akcelerácia spomaľovanie a ustálený stav. V grafe je možné pozorovať pomaly sa zrýchľujúcu mieru erózie. V ideálnom prípade by tento graf mal byť podobný grafu z obrázku 12. V tomto prípade však pozorujeme prechodný stav medzi inkubačnou dobou a fázou akcelerácie. Na tomto grafe je zrejme, že materiál pre tento experiment nebol zvolený vhodne. Dôvodom je vysoká mechanická pevnosť zvolenej zliatiny hliníku.



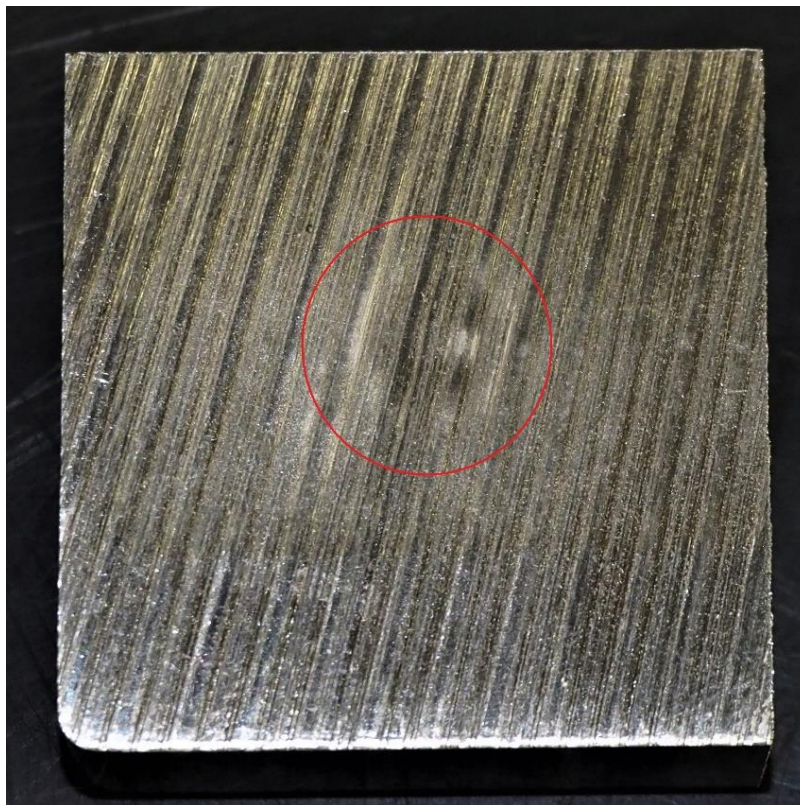
Obr. 28 Rýchlosť erózie závislá na čase

## 7.2. Vizuálne pozorovanie kavitačnej erózie

Ako bolo naznačené v kapitole 6.1, súčasťou vyhodnotenia experimentu kavitačnej odolnosti materiálu je aj vizuálne pozorovanie priebehu experimentu. Počas inkubačnej doby sa materiál vystavený kavitačnej erózií neoddeľuje. Zmeny prebiehajú iba na mikroskopickej úrovni, je ich však možné pozorovať aj voľným okom. Sprievodné javy implózie kavity, ako sú napríklad tlakové rázy alebo micro jet-y, plasticky deformujú povrch ovplyvnenej súčiastky. Na povrchu sa časom zreteľne objavuje obrazec vytvorený kavitačnou eróziou. Obrazec má tvar kruhu a jeho vznik je zapríčinený nižším lokálnym kavitačným číslom v tejto oblasti. To má za následok vyššiu hustotu vznikajúcich kavít v tejto oblasti.

### 7.2.1. Vzorky 1-3

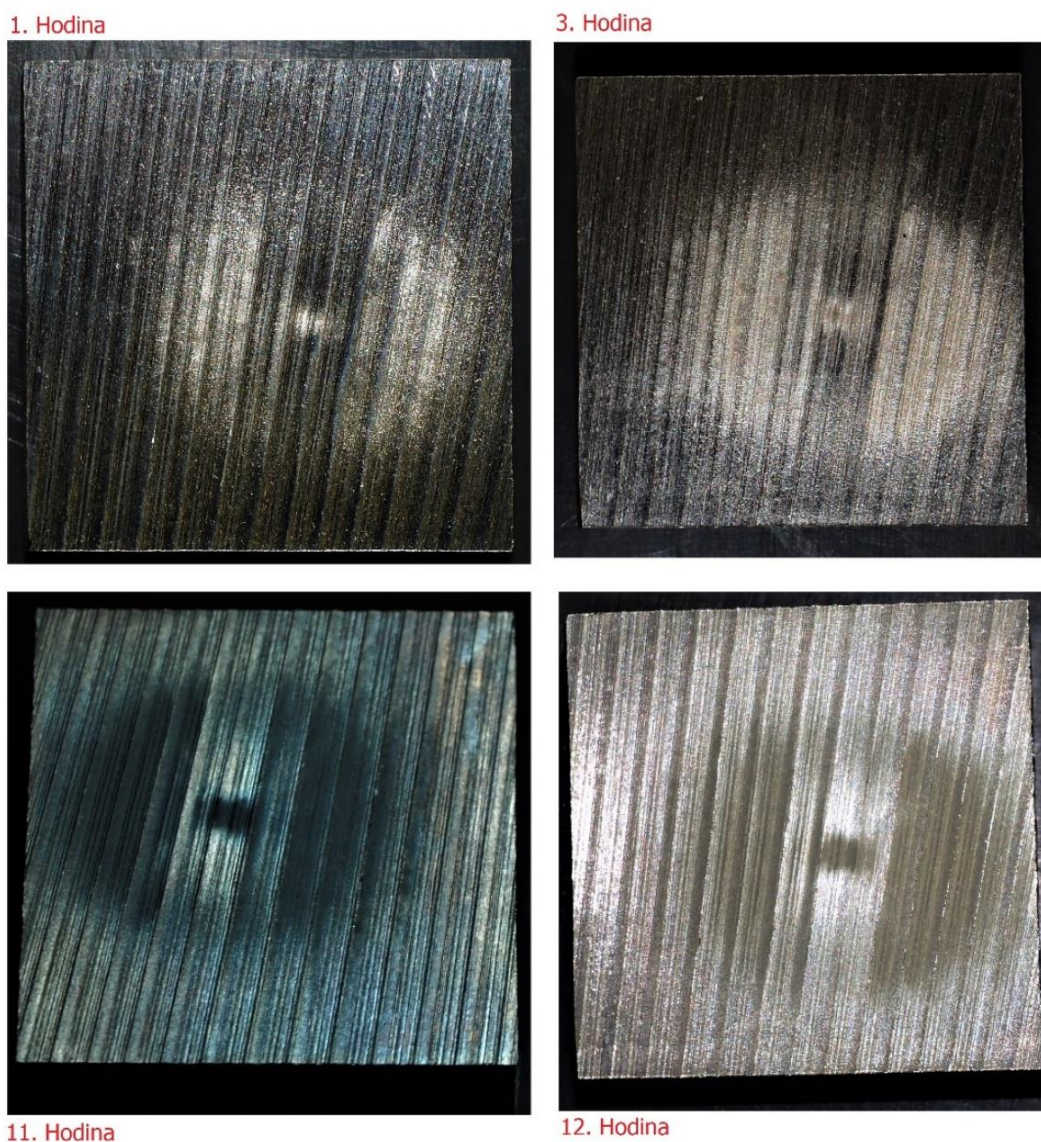
Vzorky s číselným označením 1 až 3 zodpovedajú pracovnému tlaku 90 barov a odstupové vzdialenosti sú 10, 30 a 60 mm. Podľa tabuľky 2 je zrejme, že vzorka číslo 1 mala osobitne nepriaznivé podmienky, v kontexte efektivity kavitačnej erózie. Nízky výkon trysky, vysoké kavitačné číslo a odstupová vzdialenosť s tretinovou hodnotou optimálneho odstupu vytvorili podmienky pre vznik kavitácie s nízkou intenzitou. Obrázok 29 zobrazuje poškodenie vzorky (červený kruh) kavitáciou po dvoch hodinách nepretržitého testovania. Je možné pozorovať kavitačne ovplyvnenú oblasť v tvare kruhu s priemerom približne 10 mm. Bod nachádzajúci sa približne v strede oblasti označuje miesto dopadu kavitačného lúča.



Obr. 29 Vzorka č. 1

Séria fotografií vzorky číslo 2 vyfotená v priebehu dvanásť hodín trvajúceho experimentu demonštruje vplyv odstupu na efektívite kavitačného lúča. Po hodine je zreteľne viditeľná oblasť, značne ovplyvnená kavitáciou. Znovu je viditeľný bod v strede oblasti vzniknutý

dopadom prúdu na vzorku. Priemer ovplyvnenej oblasti je približne 20 mm, je však podstatne širšia a hranice nie sú zreteľné.



Obr. 30 Vzorka č. 2

V poradí tretia testovaná vzorka bola vystavená kavitačnému lúču po dobu dvoch hodín a vzdialenosť dýzy bola 60 mm. Je možné pozorovať, že ovplyvnená oblasť pokrýva značnú plochu vzorky a jej priemer je približne 20 mm. Všimnime si, že ovplyvnený povrch je značne plasticky deformovaný. Je možné pozorovať počiatočné fázy kavitačnej erózie a pórovitý povrch charakteristický pre kavitačnú eróziu.

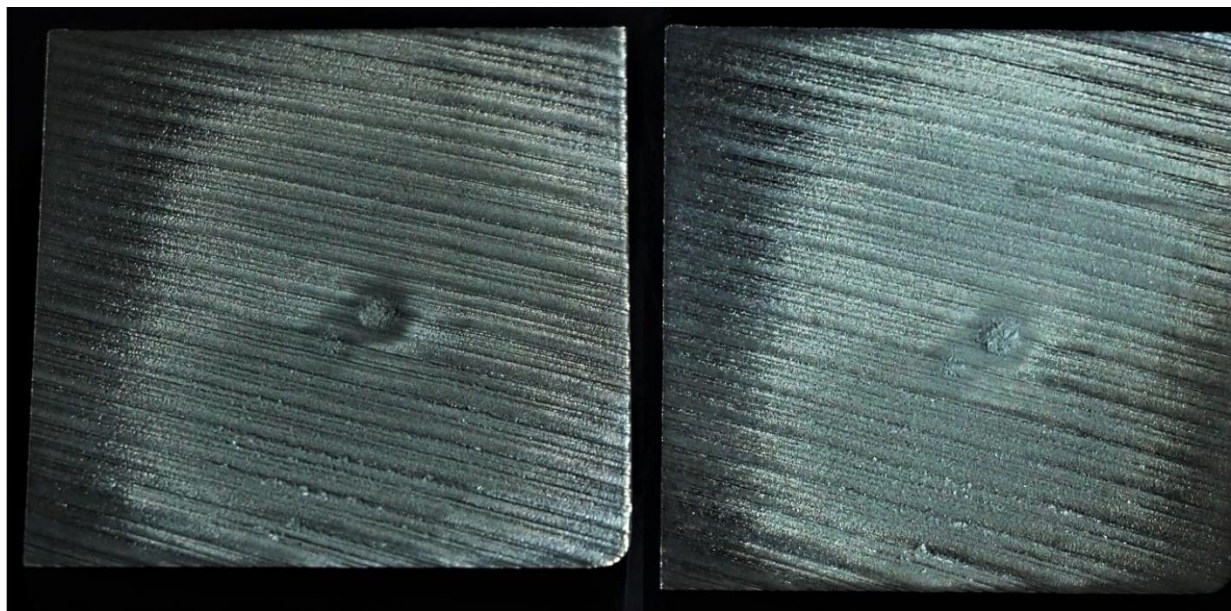
Porovnaním vzorky 1, 2 a 3 je evidentné, že predpokladaná optimálna vzdialenosť je pre tento tlak skutočne približne 30 mm.



Obr. 31 Vzorka č. 3

### 7.2.1. Vzorka č. 5

Test pre pracovný bod 5 prebiehal na parametroch  $p_2 = 13,5 \text{ MPa}$  a  $s_{off} = 30 \text{ mm}$ . Efekty kavitačnej erózie sú jasne viditeľné a sú dôkazom vyššej agresivity kavitácie.



8. Hodina

9. Hodina

Obr. 32 Vzorka č. 5

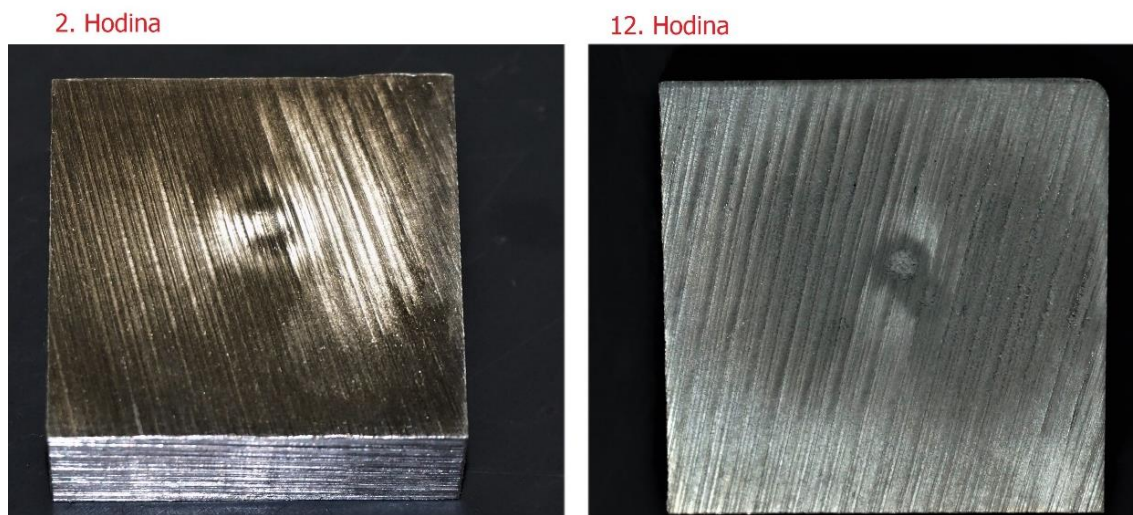
Porovnaním vzorky č. 2 a č. 5 je zřejmé, že povrch vzorky je viditelně erodovaný. Na pozorované vzorce bol po jedenácti hodinách nameraný úbytok materiálu  $\Delta m = 8,5 \text{ mg}$ . V centre ovplyvnenej oblasti je jasne pozorovaná priehlbina vytvorená vymieľaním povrchu vzorky vodným lúčom. Je zřejmé, že v tomto mieste sa počiatková fáza kavitačnej erózie ukončila. Druhou fázou je akcelerácia. Jednotlivé zrná sa boli zo vzorky postupne uvoľňované. Vzniká oblasť vyhlbeného materiálu – priehlbina, ktorá sa ďalej prehľbuje a rozširuje.

Indukcia, charakterizovaná vytvrdzovaním a akumuláciou plastickej deformácie, je jasne viditeľná na periférii ovplyvnenej oblasti ako jemne zdrsnený povrch vzorky. Jasné svetlé body v tejto oblasti sú pozostatkom implózie kavit s vyššou energiou. Postupný progres erózie a rozširovanie kavitáciou ovplyvnenej oblasti je jasne zreteľný pri porovnaní vzorky medzi 8. a 9. hodinou, skrz početnosť svetlejších bodov na povrchu vzorky.

### 7.2.2. Vzorky 7-9

Pracovné body s označením 7 až 9 boli merané zo vstrekovacím tlakom 180 barov. V porovnaní so vzorkami 1, 2 a 3 je evidentné, že poškodenie materiálu kavitáciou je výraznejšie. V prípade vzorky 8, vystavenej účinkom kavitácie po dobu 27 hodín bol zaznamenaný úbytok 170 mg materiálu.

Nasledujúci obrázok zobrazuje vzorku číslo 7 a zmenu povrchu v priebehu experimentu. Kavítácia po dvoch hodinách zanechala výrazné stopy na povrchu vzorky. Vznikla charakteristická stopa v tvare kruhu s priemerom 10 mm. Podobná stopa sa objavila aj na prvej vzorke. V tomto prípade je tento povrch evidentne zreteľný voľným okom a po dvanástich hodinách je možné pozorovať prvé náznaky kavitačnej erózie.

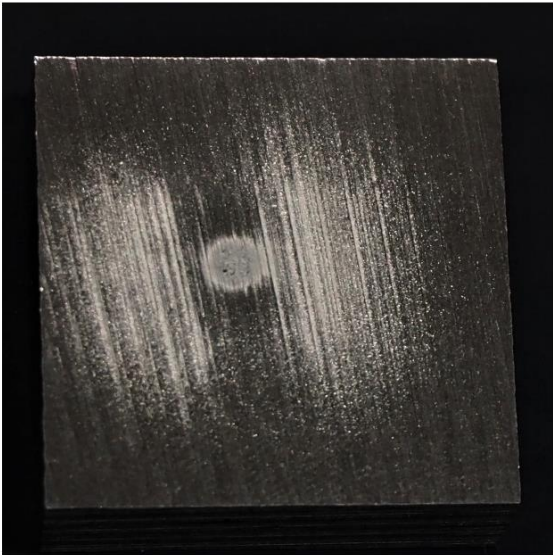


Obr. 33 Vzorka č. 7

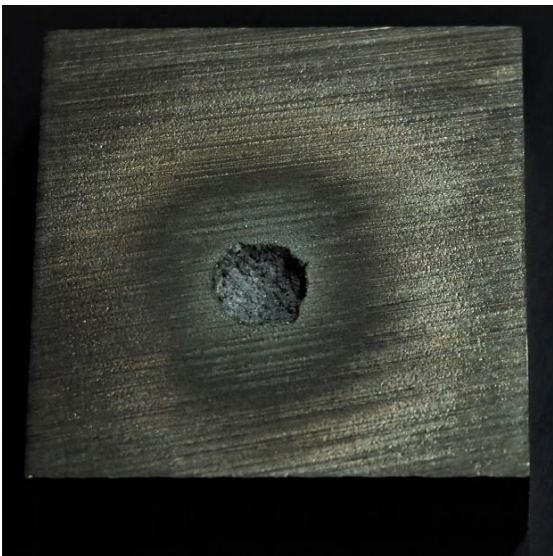
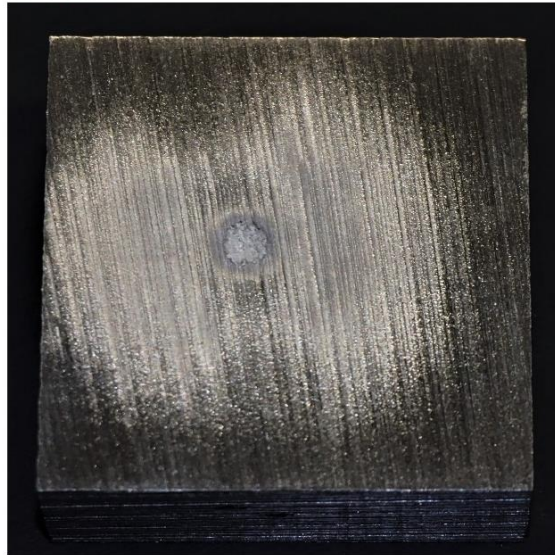
Vzorka 8 bola kavitačnej erózií vystavená 27 hodín. Je možné pozorovať, že úber materiálu je evidentný už po prvej hodine testovania. Kráter, ktorý vznikol dopadom kavitačného lúča má priemer niekoľko milimetrov a na prvý pohľad je možné pozorovať preliačinu. V okolí dopadu lúča je evidentné, že kavítácia plastickey deformuje povrch už v prvých fázach prebiehajúceho experimentu. Po dvoch hodinách je vplyv erózie jasne viditeľný a rádius ovplyvnenej oblasti sa zväčšuje a zvýrazňuje. Na povrchu vzoriek je možné

pozorovať jasne viditeľné body. Tieto body sú pozostatkom implózie jednotlivých kavit v blízkosti povrchu vzorky.

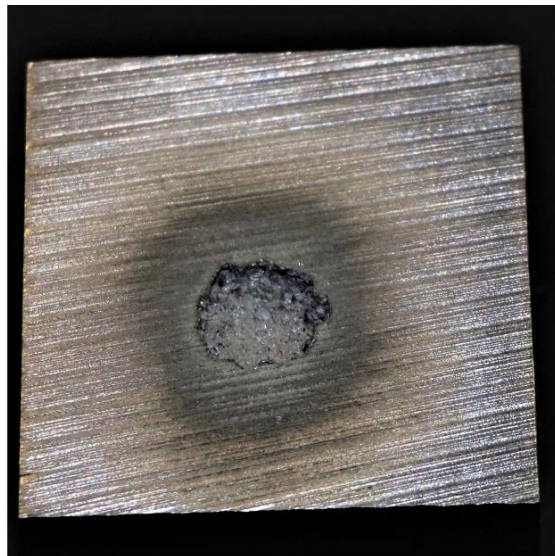
1. Hodina



2. Hodina



19. Hodina

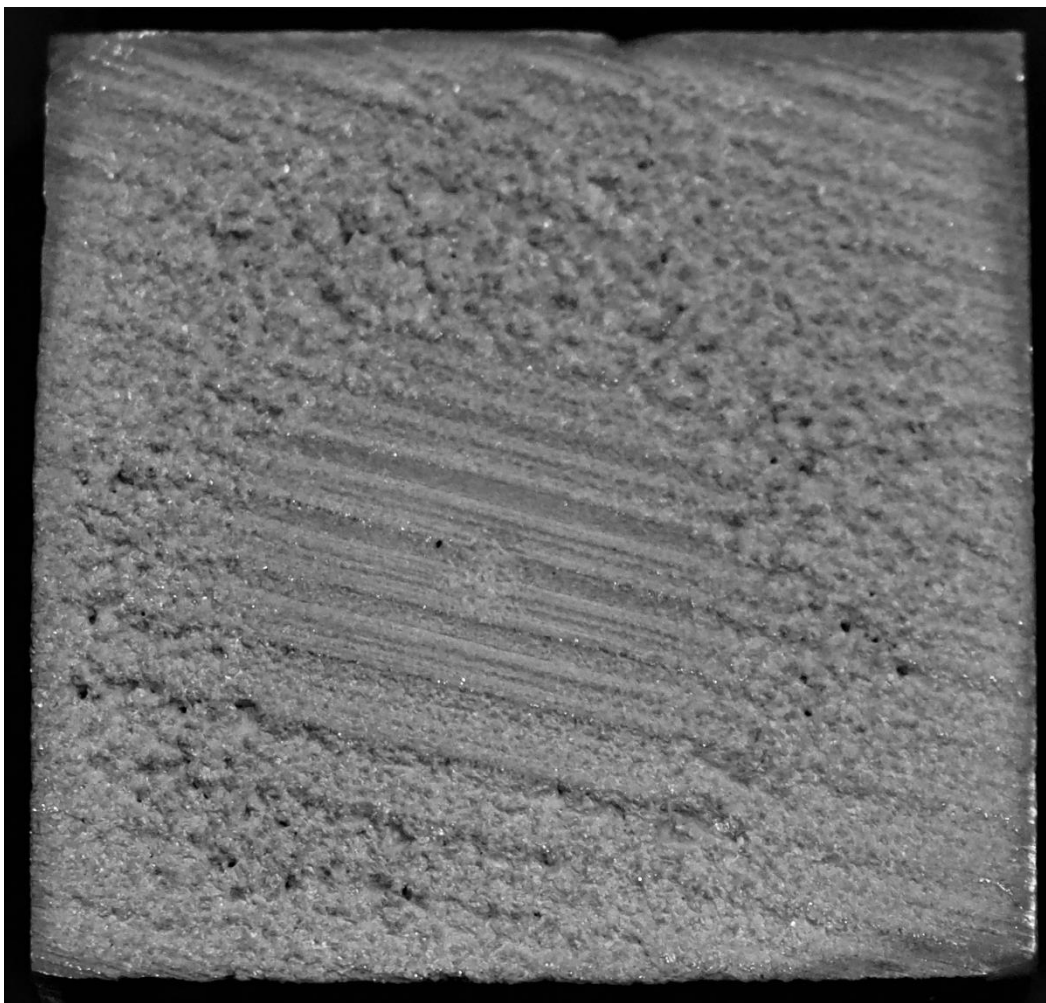


27. Hodina

Po devätnástich hodinách sa kráter v mieste dopadu rozšíril a jeho priemer narástol na 5 mm. Kráter sa prehĺbil a steny sú strmšie. Na hranách kráteru je možné pozorovať ďalšiu fázu kavitačnej erózie.

Ak je materiál vystavený kavitácii, jeho povrch sa v počiatočných fázach plasticky deformuje. Materiál je na mikroskopickej úrovni cyklicky namáhaný a v kryštalickej mriežke materiálu vznikajú defekty a narastá vnútorné napätie. Hovoríme, že materiál sa povrchovo vytvrdzuje. Ak je však kavitácia prítomná dlhodobo, vnútorné napätie a neustávajúce tlakové pulzácie začnú vytrhávať jednotlivé zrná a materiál začne strácať hmotu. Presne to je možné pozorovať na vzorke po 19. a 27. hodine testovania.

Po dvadsiatichsiedmich hodinách sa kráter rozšíril o niekoľko milimetrov a chýbajúce zrná sú zreteľne pozorovateľné na okraji priehlbiny. Paradoxne okolitý povrch sa vôbec nezmenil. Príčinou je výrazne deformovaná oblasť v kráteri, ktorá presmerovala lúč od materiálu a tak kavity unášané prúdom implodovali v objeme kavitačnej komory. Ošetrovaná oblasť je na dotyk jemne zdrsnená. Okraje kráteru sú naopak ostré a jasne odlišiteľné od okolitého povrchu.



Obr. 34 Vzorka č. 9

Vzorka číslo 9 bola vystavená kavitačnej erózií po dobu dvanástich hodín. Vstrekovací tlak dýzy bol 180 barov a odstupová vzdialenosť  $s_{off} = 60 \text{ mm}$ . Na vzorke je jasne viditeľná kavitáciou ovplyvnená oblasť. Povrch vzorky je značne plasticky deformovaný. To značí, že kavitácia bola silne agresívna a energetická. Ovplyvnená oblasť má tvar medzikružia s priemerom približne 25mm. Povrch je drsný a sú na ňom jasne viditeľné priehlbiny s rozmermi rádovo v milimetroch. Celkovo je na povrchu viditeľný úbytok materiálu a vizuálne pozorovanie spolu s hmatom odhalilo, že povrch vzorky je zvlnený, čo značí, že počas testu dochádzalo k úberu materiálu.

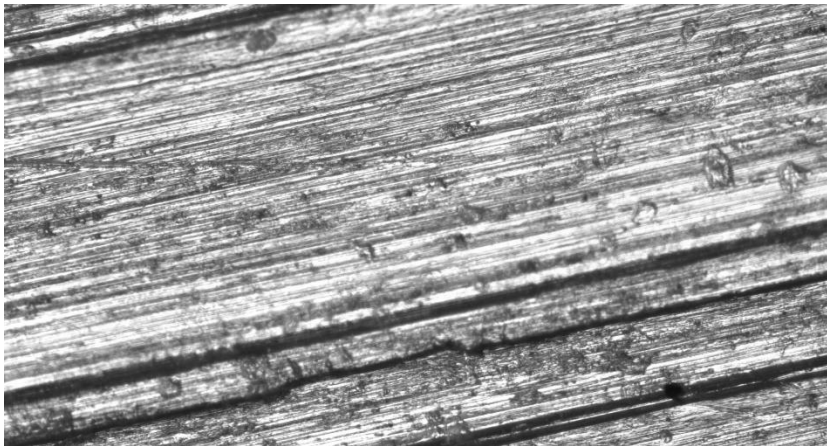
V centre je možné pozorovať oblasť dopadu kavitačného lúča. Oproti oblasti v tvare medzikružia je miesto dopadu kavitáciou ovplyvnené výrazne menej, čoho následnom je výrazne plytšia priehlbina v centre.

### 7.3. Pozorovanie mikroskopom

Vizuálnym pozorovaním voľným okom je možné zachytiť makroskopické zmeny na povrchu jednotlivých vzoriek. Pre lepšie pochopenie správania sa materiálu je nutné pozorovať povrch na mikroskopickej úrovni

Pozorovanie bolo vykonávané optickým mikroskopom. Nasvecovanie vzorky bolo realizované koaxiálnym lúčom a obraz zachytával vstavaný optický snímač. Signál bol následne spracovávaný počítačom. Rozmer pozorovanej plochy je približne 0,2 mm.

Na úvod je potrebné zobrazit' podobu kavitačne neovplyvnenej oblasti. Obrázok 35 slúži na porovnanie kavitáciou ošetrovaných plôch.



Obr. 35 Neovplyvnená oblasť

#### 7.3.1. Vzorka č. 5

Mikroskopický snímok piatej vzorky zachytáva stred priehlbiny vzniknutej dopadom kavitačného lúča. Na obrázku je možné pozorovať počiatočné fázy kavitačnej erózie. Jednotlivé svetlé body predstavujú miesto impaktu micro jet-u. Pozostatkom impaktu je plasticky deformovaná oblasť (šípka 2). Celý povrch pozorovanej oblasti je husto posiaty miestami ovplyvnenými implóziou. Na povrchu je možné vidieť nehomogenitu hustoty impaktov. To značí, že kavitácia preferovane zaniká na miestach vyčnievajúcich z povrchu.

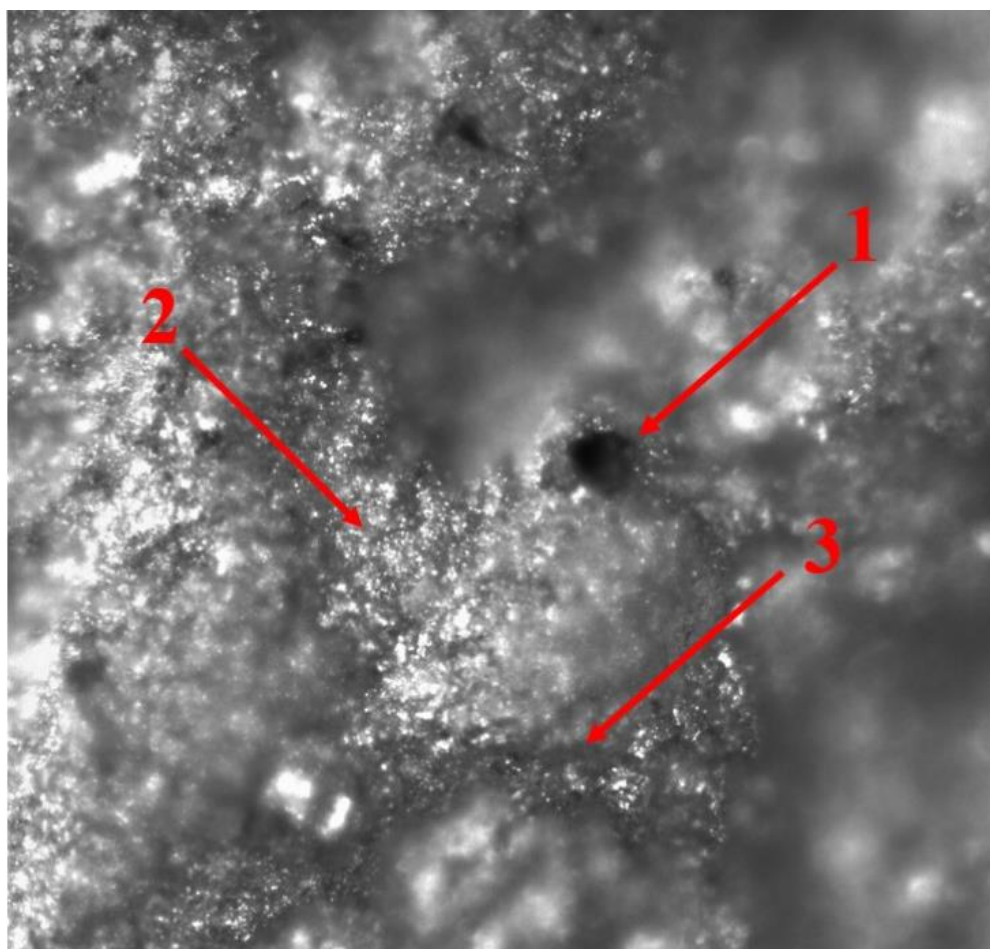
Šípka číslo 1 zobrazuje miesto, v ktorom je jasne zreteľný úbytok materiálu. Dôvodov vzniku tejto kavity môže byť niekoľko:

Prvým z nich je, že v tomto mieste sa nachádzala v materiáli nečistota, ktorá bola prúdom kvapaliny a tlakovými rázmi erodovaná, alebo uvoľnená, rýchlejšie ako okolitý povrch.

Druhou možnosťou vzniku tejto dutiny je erózia spôsobená dopadom vodného lúča presne do tohto miesta. Charakter vzniku tohto priestoru by bol podmienený mechanickým dopadom vysokotlakého lúča kvapaliny a v princípe by išlo o proces podobný technológii rezania vodným lúčom.

Poslednou možnosťou je, že v tomto mieste došlo k zániku kavity sprevádzanej micro jet-om s nadpriemernou energiou. Schopnosti micro jet-u vytvoriť v materiáli kavity sú popísané v nasledujúcich kapitolách.

Tretia šípka zvyrazňuje hranicu zrna. Hranica je zobrazená, ako oblasť s nižšou mierou plastických deformácií a je evidentné, že na povrchu vytvára údolie. Ak by sme toto údolie sledovali zistili by sme, že sa uzatvára.



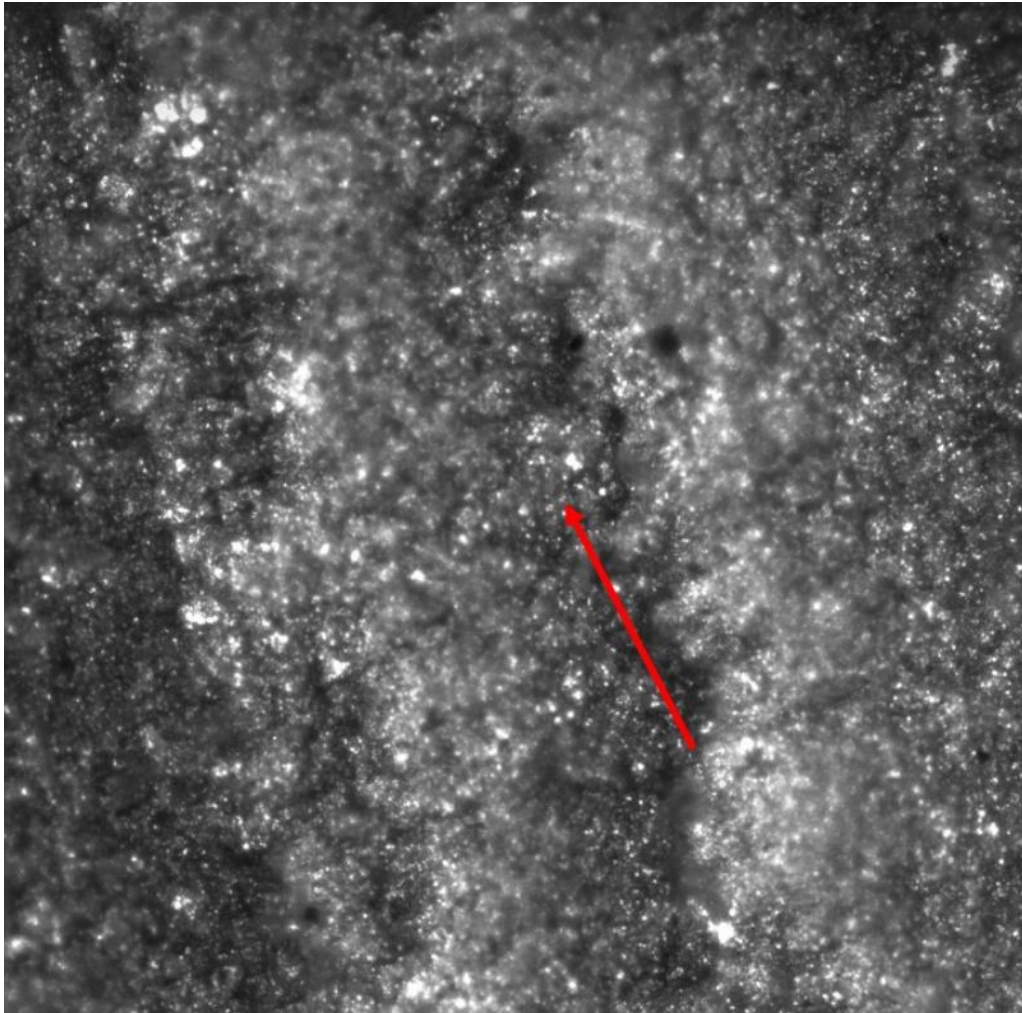
Obr. 36 Stred priehlbiny

### 7.3.2. Vzorka č. 7

Siedma vzorka bola vytavená kavitačnému lúču s tlakom 18 MPa zo vzdialenosti 10 mm po dobu dvanástich hodín. Séria fotografií zobrazuje kavitáciou málo ovplyvnenú oblasť a centrum dopadu lúča

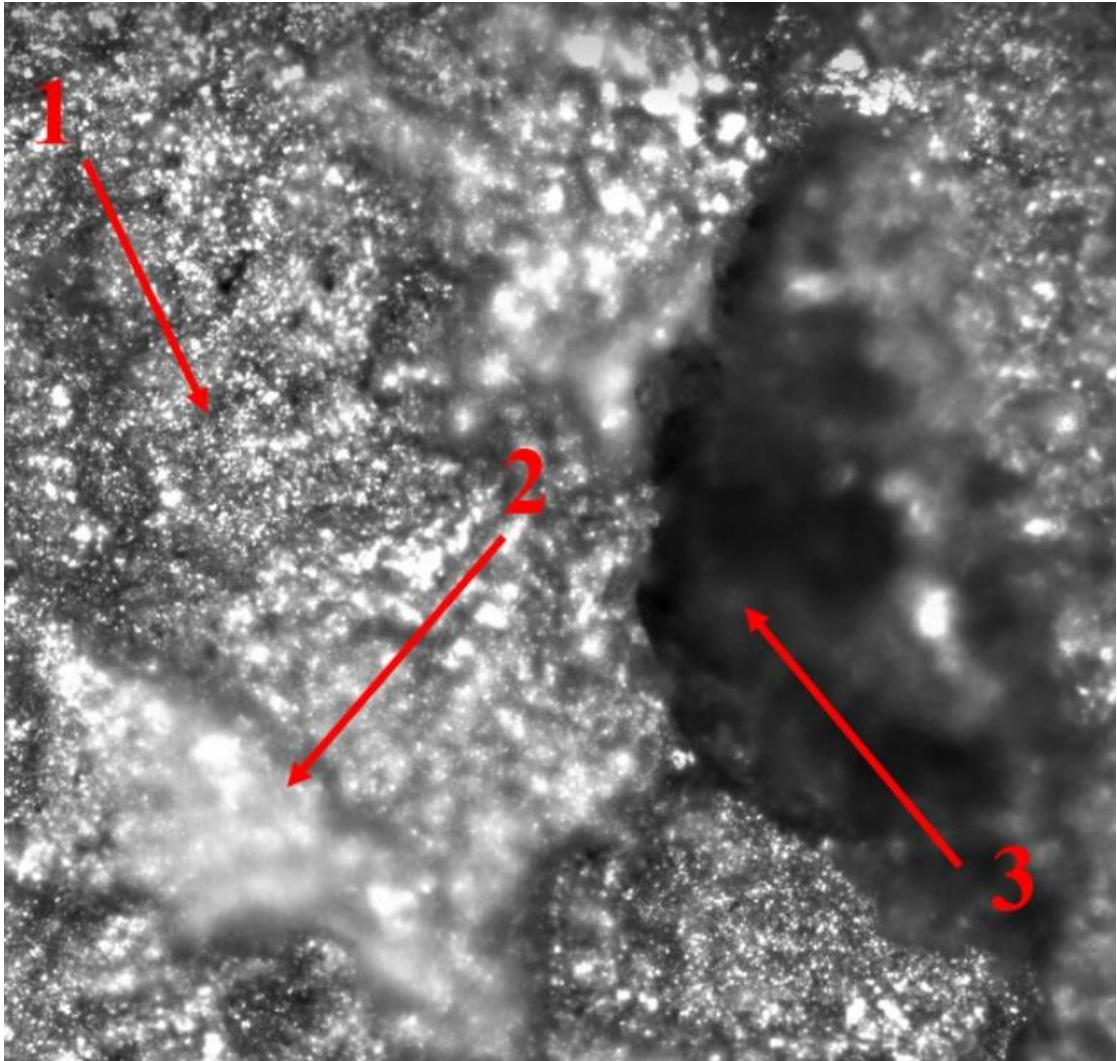
Na obrázku 37 je možné pozorovať, že kavitácia je vo väčšej vzdialenosti od epicentra málo intenzívna. Je možné pozorovať jednotlivé miesta dopadu micro jet-ov. V priemere je hustota dopadov mierna a sústredí sa hlavne na vyvýšené miesta povrchu. Tieto vyvýšeniny sú

Ľahlo pozorovateľné pásma svetlejších plôch smerujúce paralelne s červenou šípkou. Výraznejšie plastické deformácie úplne absentujú a môžeme prehlásiť, že kavitačná erózia je v tomto mieste iba v počiatočnej fáze inkubačnej doby.



Obr. 37 Okraj kavitačne ovplyvnenej oblasti

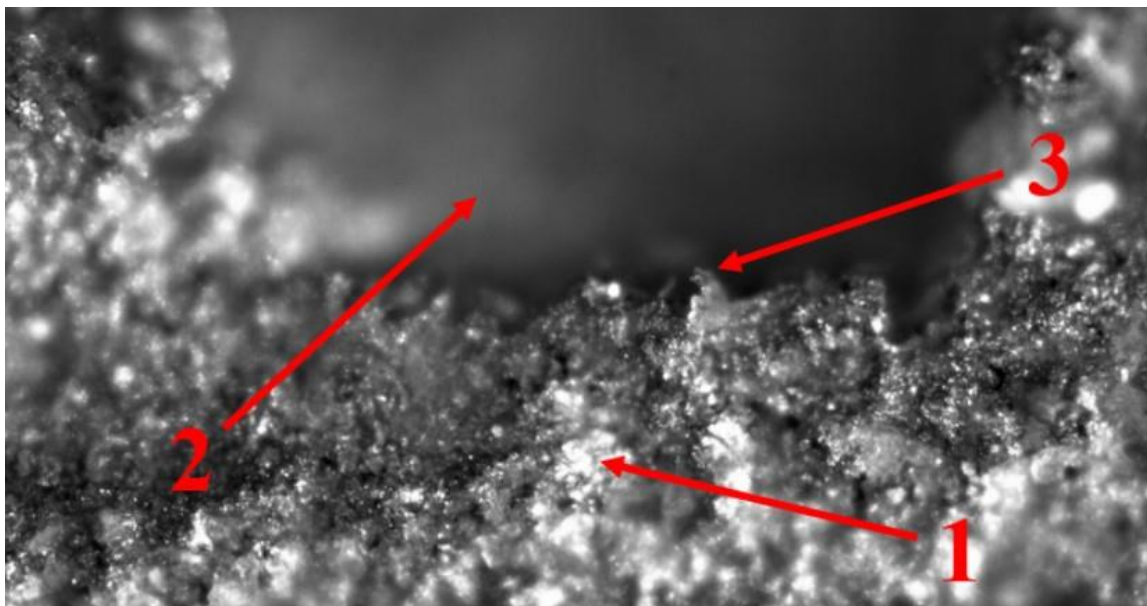
Snímka 38 zobrazuje priame centrum dopadu kavitačného lúča a zobrazuje počiatok akceleračnej fázy kavitačnej erózie. Najvýraznejším miestom fotografie je tmavá škvrna zobrazujúca dieru po vyštípenom zrne (šípka 3). Z nej je možné pozorovať vetviacu sa hranicu zŕn označenú druhou šípkou. Porovnaním s obrázkom 36 je jasne zreteľné, že hranica je čiastočne erodovaná. Šípka 1 mieri na susedné zrno, ktorého povrch je plasticky deformovaný a prechádza si inkubačnou dobou.



Obr. 38 Stred kavitačne ovplyvnenej oblasti

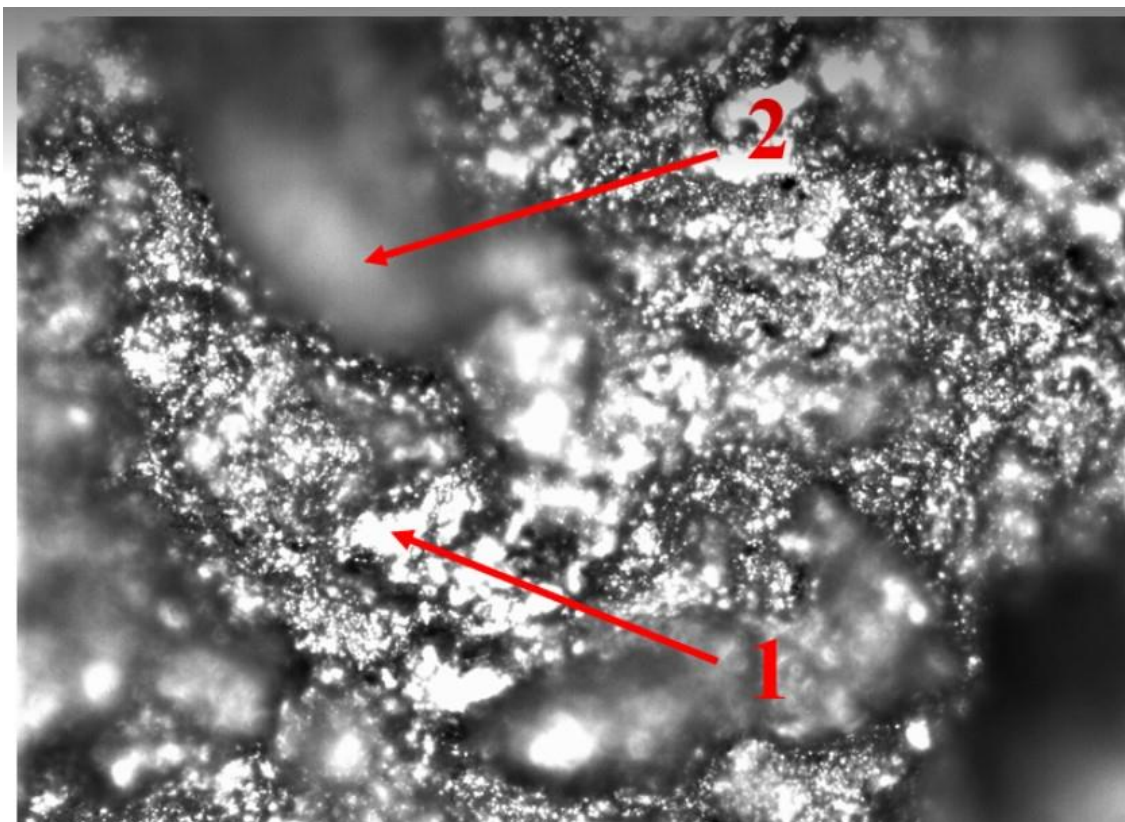
### 7.3.3. Vzorka č. 8

Snímky 39 a 40 zobrazujú tvar povrchu vzorky po 27 hodin trvajúcom experimente. Obrázok 39 zobrazuje hranicu erodovaného kráteru. Šípka 1 zobrazuje povrch vzorky. Je možné si všimnúť, že besprostredne na hranici je povrch zdrsnený eróziou ale zároveň je plastická deformácia málo zastúpená. V kontexte s pozorovaným dôkazom agresívne vytrhnutého zrna (šípka 2 a 3) je možné vyvodit' záver, že povrch v okolí je kavitáciou vytvrdený natoľko, že materiál sa vyštiepuje.



Obr. 39 Hranica kráteru

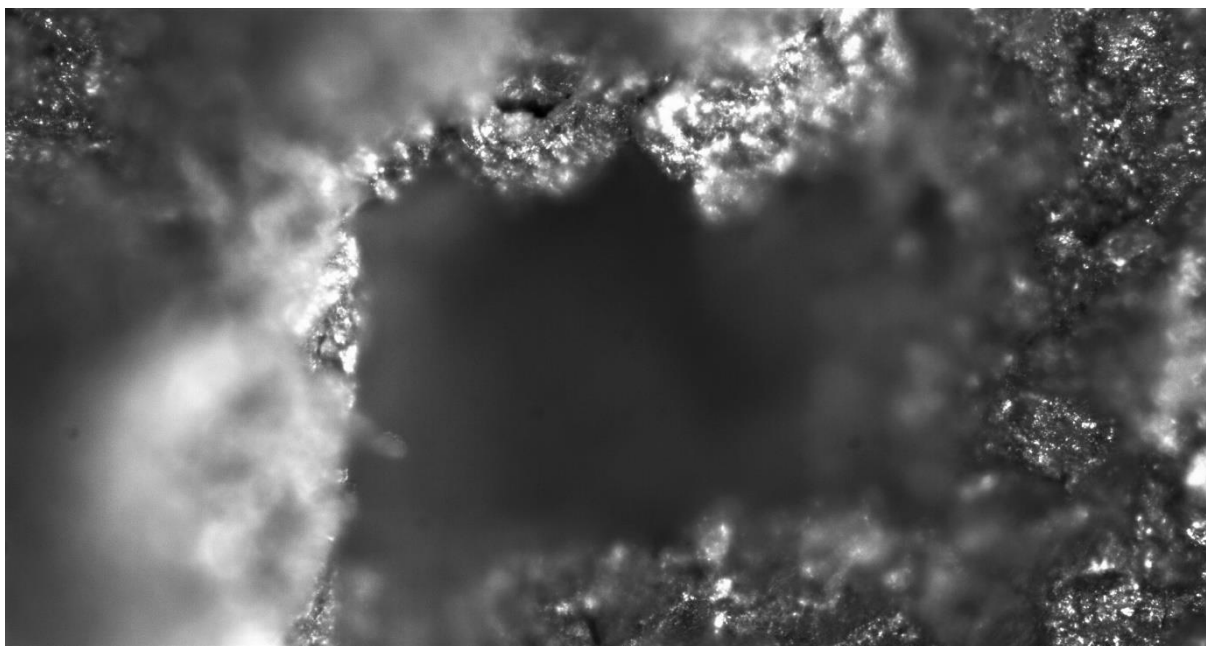
Obrázok 40 zobrazuje značne deformované dno kráteru. Je možné pozorovať silne plasticky deformované priehlbiny (šípka 2) a ich okolie husto posiate impaktmi micro jet-ov generovaných menšími bublinami.



Obr. 40 Centrum kráteru

### 7.3.4. Vzorka č. 9

Zastúpením, najviac plastickej deformácie je možné pozorovať na povrchu vzorky číslo 9. Po dvanástich hodinách je (ako už bolo spomínané predchádzajúcich kapitolách) kavitáciou poškodený celý povrch vzorky. Voľným okom je možné pozorovať dutiny v materiáli vzniknuté dopadom vysokoenergetických micro jet-ov. Detailná snímka z mikroskopu odhaľuje povrch, ktorý je značne narušený vplyvom agresívnej kavitačnej erózie. Snímka zobrazuje objemnú dutinu na povrchu. Hĺbka dutiny je niekoľkonásobne väčšia ako jej priemer a zasahuje hlboko do vnútra materiálu vzorky. Paradoxne, zobrazená dutina, ktorá sa nachádza na okraji erodovanej oblasti, je v porovnaní s ostatnými dutinami na vzorke podstatne menšia. Dôvodom výberu tejto kavity, pre potreby fotografie, je samotný priemer väčších kavít, ktoré by sa nevošli do záberu mikroskopu.



Obr. 41 Dutina vzniknutá kavitačnou eróziou

## 7.4. Zhodnotenie

Úlohou práce bolo experimentálne určiť optimálnu odstupovú vzdialenosť trysky od vzorky. Porovnaním hodnôt, predpokladanej optimálnej odstupovej vzdialenosti, zobrazených v tabuľke 2 a experimentálnymi výsledkami je možné konštatovať, že odhad optimálnej vzdialenosti bol v rámci predpokladaných výsledkov.

Pre vstrekovací tlak 9 MPa bola vypočítaná optimálna vzdialenosť 32 mm. Z experimentu je evidentné, že najlepšie výsledky boli dosiahnuté práve na vzdialenosti 30 mm. Aj napriek tomu, že úbytok materiálu nebol pozorovaný, môžeme konštatovať, že ak by experiment prebiehal dlhšie, mohli by sme pozorovať väčší úbytok materiálu, než pre iné odstupy.

Rovnakým prípadom sú aj vzorky vystavené tryske so vstrekovacím tlakom 18 MPa. V tomto prípade bola predpokladaná odstupová vzdialenosť 49 mm. Ak porovnáme nami testované odstupové vzdialenosti s klasifikačnou mapou (Obr. 20), vidíme, že testy prebiehali bezpečne v oblasti, prevažujúcej erózie vodným lúčom (bod 8) a v oblasti kavitačnej erózie

(bod 9). Preto je možné prehlásiť, že vypočítaná optimálna vzdialenosť je, v rámci našich potrieb, správna.

Z dôvodu malého množstva poskytnutých vzoriek a z dôvodu časovej náročnosti experimentov, nebolo možné dôkladne prešetriť správnosť vypočítaných predpokladaných odstupových vzdialeností s dostatočnou presnosťou.

Pre budúce prešetrenie správnosti výsledkov by bolo vhodnejšie zvoliť kavitačne menej odolný materiál. Odporúčaným materiálom je napríklad Al99,5.

## Záver

Kavitačná erózia je jedným zo sprievodných javov, vyskytujúcich sa v hydraulických zariadeniach, ktoré trpia výskytom kavitácie. Konštruktéri sa z dôvodu nepriaznivých účinkov kavitácie snažia pri návrhu hydraulických zariadení, aktívne bojovať proti jej výskytu. Jednou z možností je používať materiály alebo povlaky, odolné voči kavitačnej erózii. Z tohto dôvodu sa vyvíjajú rôzne metódy, určené na testovanie materiálov. Jednou z možností je použitie kavitačnej trysky. Tejto experimentálnej metóde, ktorá je podchytená normou ASTM G134-17, sa venuje práve táto diplomová práca.

Teoretická časť diplomovej práce definovala kavitáciu, jej vznik, životný cyklus, matematický popis a sprievodné javy kavitácie. Rešeršná časť sa ďalej zaoberá kavitačnou eróziou, jej vplyvom na materiál a možnosťami testovania kavitačnej odolnosti materiálov.

Praktická a experimentálna časť sa venovala popisu zariadenia použitého v experimente, návrhu experimentu a vyhodnoteniu získaných dát pre rôzne počiatočné podmienky testu. Použité zariadenie pozostáva z vysokotlakového čerpadla, dýzy a kavitačnej (testovacej) komory. Sledovanými hodnotami bol čas a úbytok materiálu meraný v miligramoch. Následne sme z dát získali hodnoty zmeny hmotnosti závislé na čase, z ktorých sa vykreslili grafy.

Pre úplné zhodnotenie experimentov sa popísali získané vzorky na makroskopickú aj mikroskopickú úroveň. Porovnaním výsledkov s vypočítanými hodnotami optimálneho odstupu dýzy sme dospeli k záveru, že nami vypočítané hodnoty boli približne správne.

Z dôvodu malého množstva poskytnutých vzoriek a z dôvodu časovej náročnosti experimentov, nebolo možné dôkladne prešetriť správnosť vypočítaných predpokladaných odstupových vzdialeností s dostatočnou presnosťou.

Pre budúce prešetrenie správnosti výsledkov by bolo vhodnejšie zvoliť kavitačne menej odolný materiál. Odporúčaným materiálom je napríklad A199,5.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] SOYAMA, Hitoshi, Seiji SHIMIZU, Shuji HATTORI a Georges CHAHINE. Interlaboratory Study on Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by a Cavitating Jet. *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018)* [online]. 2019, 581–584. Dostupné z: doi:10.1115/1.861851\_ch111
- [2] BRENNEN, Christopher Earls. *Cavitation and bubble dynamics* [online]. 1995. ISBN 9781107338760. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781107338760
- [3] EISENBERG, Phuillip. Cavitation. *Trans. ASME* [online]. 1935, **37**, 423–424. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-052351-4.50071-6
- [4] ROVDER, Juraj. *Kavitační ohříváč*. B.m., 2018. b.n.
- [5] MANCUSO, Giuseppe, Michaela LAGONE a Gianni ADREOTTOLA. A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: principles and applications [online]. 2020, 23. Dostupné z: doi:10.1007/s40201-020-00444-5
- [6] FERRIMAN, A. Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction. *BMJ (Clinical research ed.)* [online]. 2014, **106**(7239), 889. ISSN 09598138. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-017-8539-6
- [7] BRENNEN, C. E. An Introduction to Cavitation Fundamentals. *WIMRC Forum* [online]. 2011, (July), 1–17. Dostupné z: <http://authors.library.caltech.edu/28373/>
- [8] FRANC, Jean-Pierre; a Jean-Marie MICHEL. *Fundamentals of cavitation*. B.m.: Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN 14-020-2232-8.
- [9] SOYAMA, Hitoshi. Cavitating Jet : A Review. 2020, 18–27.
- [10] Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by Cavitating Liquid Jet 1. *ASTM Book of Standards* [online]. 2020, **95**(2010), 1–17. Dostupné z: doi:10.1520/G0134-17.Copyright
- [11] SOYAMA, Hitoshi. Effect of nozzle geometry on a standard cavitation erosion test using a cavitating jet. *Wear* [online]. 2013, **297**(1–2), 895–902. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2012.11.008