

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

EROZIVNÍ ÚČINKY KAVITACE

EROSIVE EFFECT OF CAVITATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN JUREČKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. F. POCHYLÝ, CSC.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jurečka Martin

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:

Erozivní účinky kavitace

v anglickém jazyce:

Erosive effect of cavitation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Záměrem je studium erozivních účinků kavitace a možnosti jejich omezování jak z hlediska materiálového provedení, tak z hlediska úpravy kapalin a tvaru povrchů.

Cíle bakalářské práce:

Cílem je zpracování literární rešerše o erozivních účincích, způsobených kavitací na jedné straně a eliminace těchto účinků na straně druhé.

Seznam odborné literatury:

- Noskievič, J.: Kavítace, Academia Praha, 1969

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. František Pochylý, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 30.11.2009

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Česká verze:

Cílem této práce je seznámit technickou veřejnost obecně s erozivními účinky kavitace a možnosti jejich omezování. Dále je zde uvedeno naopak možné kladné využití kavitačního jevu v různých odvětvích lidského působení.

English version:

The goal of the submitted thesis is to acquaint the general public with the technical erosive effects of cavitation and the possibility of limiting them. The next part of the thesis states positive usage of cavitation in different sectors of human operation.

Klíčová slova:

Kavitace, erozivní účinky kavitace, využití kavitačního jevu, omezení kavitačního jevu

Keywords:

Cavitation, erosive effect of cavitation, usage of cavitation effect, restrictions of cavitation effect

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP DLE ČSN ISO 690

JUREČKA, M. Erozivní účinky kavitace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 43 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. František Pochylý, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 26.5.2010


.....
Martin Jurečka

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval prof.Ing. Františku Pochylému, CSc. za inspiraci a cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji své rodině za vytvoření ideálních podmínek ke studiu.

OBSAH

1. Úvod	8
2. Historie kavitace	9
3. Podstata a druhy kavitace	11
4. Fyzikální vlastnosti kapalin a kavitace	12
5. Účinky kavitace na materiál	14
6. Kavitační odolnost materiálů	15
6.1. Perlitické oceli	15
6.2. Austenitické oceli	17
6.3. Šedá litina	18
6.4. Slitina Titanu	18
7. Zvýšení kavitační odolnosti	21
7.1. Mechanické zpevnění materiálu	21
7.2. Navařování a plátování	21
7.3. Ochranné vrstvy	22
8. Ochrana proti kavitačním účinkům	23
8.1. Elektrická ochrana	23
8.2. Úprava kapaliny	24
9. Vodní turbíny	25
9.1. Savka turbíny	26
9.2. Kaplanova turbína	29
9.3. Francoisova turbína	30
9.4. Peltonova turbína	31
10. Superkavitace	32
10.1. Základy superkavitace	32
10.2. Budoucí využití superkavitace	33
11. Kavitace lodních šroubů	34
12. Ultrazvuková kavitace	35
12.1. Využití ultrazvukové kavitace v chirurgii	35
12.2. Využití ultrazvukové kavitace k liposukci	36
13. Desinfekční efekt hydrodynamické kavitace	38
13.1. Ozdravení a desinfekce vody tryskami generujícími kavitaci	38
14. Závěr	40
Seznam použitých zdrojů	41
Seznam použitých veličin	43



1. Úvod

Kavitace je fyzikálním jevem známým již několik staletí. Konstrukteři vodních turbín, lodních šroubů a jiných vodních děl jsou s tímto jevem v přímé interakci, avšak nejsou z této přírodní demonstrace síly nijak nadšeni. Kavitace jim práci rozhodně neulehčuje a neustále se snaží tento jev různými způsoby potlačit a zmírnit. Navzdory všem snahám o naprosté odstranění projevu kavitace stále není možné tento jev zcela odstranit a je pravděpodobné, že se tak ani nikdy nestane.

Tato práce uvádí oboustranný pohled na problémy spojené s kavitací a kavitačním narušováním materiálů. Je zde popsána možnost konvenčních ochran proti rozrušení povrchu v kontrastu s novějšími možnostmi a využitím nových technologií s větší či menší úspěšností potlačení kavitační eroze.

V neposlední řadě práce pojednává naopak o možném kladném využití kavitačního jevu pro lidské potřeby jak v civilní, tak i ve vojenské oblasti. Jedná se o romantické zamyšlení a jistou úvahu spolu s již známými fakty, jak by se mohl vývoj a výzkum kavitační problematiky dále ubírat.



2. Historie kavitace [1]

Kavitace jako fyzikální jev není pro lidstvo 21. století nový pojem. Už v roce 1754 naznačuje L. Euler kavitační teorii vodních turbín. Uvádí, že nedostatečný tlak v dokonalé kapalině může vyvolat nesrovnalosti mezi teorií a skutečnými stavy. V technické praxi se setkáváme s kavitací o něco později, a to v roce 1894 při zkouškách anglického torpédoborce Daring s lodními šrouby. Zvyšování rychlosti lodí vyžadovalo vyřešení otázky rychloběžných lodních šroubů. Tento problém byl značně naléhavý, jelikož pro pohon lodí mělo být využito rychloběžné turbíny, místo doposud využívaných parních strojů. Krátce po zkouškách torpédoborce Daring byl dostavěn pokusný torpédoborec Turbinia s turbínovým pohonem. První výsledky pokusu byly však naprosto neuspokojivé. Zdaleka se nedosáhlo předpokládané rychlosti plavidla, neboť u hnacích šroubů se vyskytla kavitace. Pokles výkonu vysvětluje poprvé v roce 1895 S.W. Barnaby tvořením bublin, které jsou dle jeho domněnky vyplněny vodní parou. Podobně poukázal i Pardons na stejné problémy při pokusném provozu torpédoborce Turbinia. Uvedl, že lodní šroub musel být během zkoušek několikrát vyměněn. Při nízkých otáčkách pracoval šroub dobře, ale při zvyšování otáček účinnost a tažná síla lodního šroubu klesala, neboť šroub pracoval v kavitaci. Destruktivní účinky kavitace, narušení povrchu, se projeví na lopatkách lodního šroubu už po několika hodinách zkušebního provozu.

U vodních turbín se vyskytla kavitace později. V roce 1907 podává Wagenbach zprávu o kavitačním narušení rotoru Francoisovy vodní turbíny hydroelektrárny v Jaice v Bosně, který byl zničen už po několika týdnech provozu. Se zvyšováním otáček vodních turbín se kavitace a její nepříznivý dopad vyskytoval stále častěji. Podobně jako u lodních šroubů závisel další vývoj vodních turbín na zkoumání nepříznivého jevu kavitace.

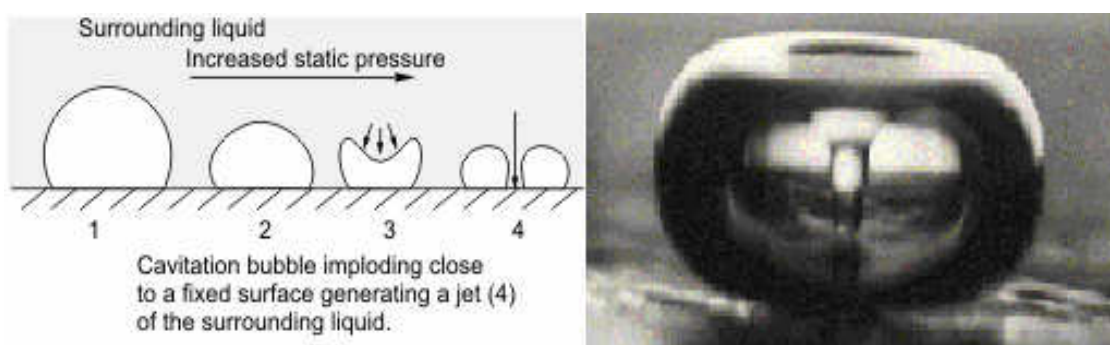
Problém kavitace se stal ještě více aktuálním po zavedení rychloběžných vrtulových vodních turbín, u nichž se kavitace vyskytovala při malých spádech. Sám vynálezce těchto turbín - profesor Kaplan - počítal v té době, že vrtulové turbíny se v důsledku kavitace uplatní jen do spádů asi 6m.

Výzkum vlastního kavitačního jevu se zaměřil nejdříve na teoretické a experimentální zjištění podmínek kavitace. Bylo zjištěno, že pro vznik kavitace je nutný pokles tlaku proudící kapaliny až na tlak nasycených vodních par, který odpovídá teplotě kapalin. Zkoumalo se chování různých profilů používaných v letectví, u nichž je projev kavitace patrný při velkých rychlostech. První výzkumné práce zkoumaly kavitaci z hlediska proudění kapalin. Teprve o něco později, kolem roku 1920, se výzkum zaměřil na studii odolnosti materiálů proti kavitační erozi. V několika hydrocentrálách byly upevněny vzorky různých materiálů na sací straně lopatek oběžného kola, kde se vyskytovala kavitace a docházelo zde ke kavitačnímu narušování povrchu. Po třech a půl letech provozu se vzorky vyhodnotily a došlo se k závěru, že nerezavějící ocel nejlépe odolává kavitačním vlivům. Tyto zkoušky byly však značně časově náročné.

Vedle kavitační koroze je věnovaná pozornost i výzkumu jevů probíhajících v kavitaci. Jedná se především o vznik a zánik kavitačních dutin. To si vyžádalo podrobnou studii fyzikálních vlastností kapalin se zaměřením na jejich tahovou pevnost.

3. Podstata a druhy kavitace [1]

Kavitací nazýváme složitý jev vzniku a zániku dutin v proudící kapalině. Podstatou samotného vzniku kavitace je snížení tlaku na tlak nasycených par, odpovídající teplotě kapaliny. Při těchto podmínkách se začne kapalina odpařovat a tvoří se v kapalině velmi malé bublinky. Tyto kavitační bublinky jsou unášeny proudící kapalinou do míst vyššího tlaku, kde pára obsažená v bublinkách kondenzuje a vytváří se kavitační dutiny. Do těchto dutin vniká okolní kapalina velkou rychlostí a v podstatě rozděluje dutinu na dvě části a dochází k implozi (obr.3.1). Paprsek vody, který rozdělil dutinu na dvě části naráží obrovskou rychlostí a za velkých teplot (uvádí se až desítky tisíc stupňů Celsia) na povrch např. lopatky lodního šroubu. To má za následek velký ráz, materiál je velmi namáhán a rozrušován.



Obr. 3.1. Průběh zániku kavitační bubliny na pevném povrchu [4]

Kavitační bubliny se sdružují v proudící kapalině a vyplňují část proudu, tvoří tzv. kavitační oblast. Zpočátku při malém poklesu tlaku pod tlak nasycených par vzniká počáteční kavitace, která se chová jako neustálená kavitační oblast, ve které se projevují menší pulsace tlaku proudící kapaliny. Kavitační oblast se tedy periodicky neustále zvětšuje a zmenšuje, avšak po dalším snížení tlaku se kavitační oblast ustálí a zvětší.

Pro popis kavitačních oblastí je rozhodující jejich tvar, místo počátečního výskytu a kavitační stálost. Tvar kavitační oblasti může být kapsovitý, kde shluk kavitačních bublin zaplňuje určitý prostor. Dále rozeznáváme vláknový tvar, kde kavitační bubliny tvoří viditelný sled v podobě vláken. Výskyt kapsovitě kavitační oblasti můžeme pozorovat například v tryskách, na lopatkách vodních strojů apod. Vláknovou kavitační oblast, zvanou též jako spárovou kavitaci, můžeme sledovat na koncích lopatek vodních turbín nebo na koncích lopatek lodních šroubů a za náboji lodních šroubů. Kavitace je dělena podle místa výskytu a může se jednat o kavitační oblast uvnitř proudu kapaliny nebo v blízkosti, popřípadě na obtékané ploše. Při místě výskytu na obtékané ploše hovoříme o plošné kavitaci, díky vizuálnímu projevu, neboť vzniká snížením tlaku při obtékání povrchu např. lopatek čerpadel, turbín nebo lodních šroubů. Posledním kritériem při posuzování kavitační oblasti je již zmíněná stálost, neboli stabilita. Stabilita tvaru kavitační oblasti se sleduje v závislosti na dvou parametrech, a to v prostoru a čase. Můžeme tvrdit, že všechny kavitační oblasti jsou považovány za nestálé, protože kavitační bubliny neustále



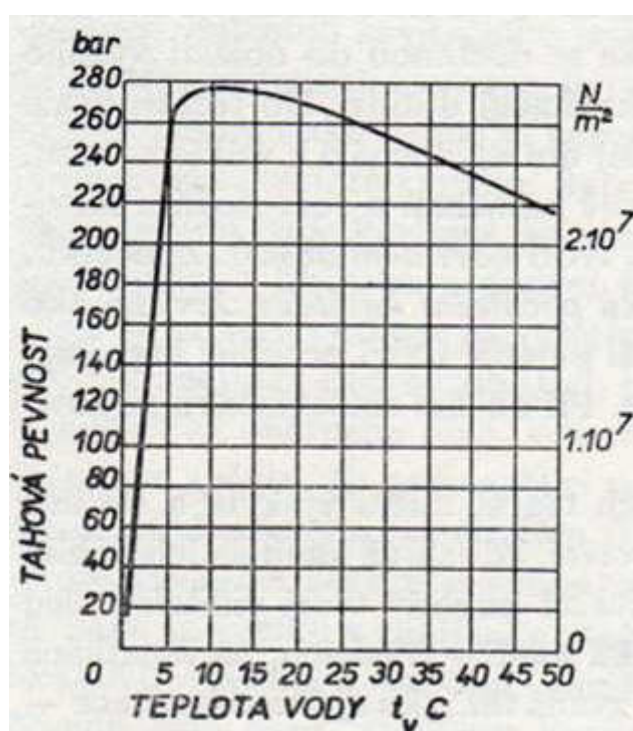
vznikají a zanikají a i místa vzniku a zániku se mohou měnit. V určitých případech však pozorujeme určitou pravidelnost kavitačního jevu, který se mění jen velmi málo. Takový projev kavitace potom považujeme za stálý. Příkladem je plošná kavitace.

Kavitační oblast může vzniknout i při odtržení proudu od obtékaného povrchu. Takto vzniklá oblast má tvar kapsovitě kavitační oblasti a je nestálá. Důsledkem této kavitace je víření kapalin mezi hlavním proudem a obtékaným povrchem. Nestálost této kavitační oblasti je vyjádřena Strouhalovým číslem. Jedná se o podobnostní číslo, které je používáno v oblasti nízkých Reynoldsových čísel ($Re < 300$).

Velmi zajímavým faktorem je také životnost kavitační bubliny. Tato bublina v oblasti zvýšeného tlaku několikrát vznikne a zanikne, než dojde k jejímu úplnému rozpadu. Životnost kavitační bubliny je přibližně 0,006s a během této velmi krátké doby zhruba 5-6krát vznikne a zanikne. Zpočátku roste pomalu a v jedné třetině své životnosti dosáhne maximálních rozměrů. Zánik dutiny probíhá rychleji než její vznik.

4. Fyzikální vlastnosti kapaliny a kavitace [1]

Kavitace a její průběh je ovlivňován vlastnostmi kapaliny. Dle kinetické teorie kapalin působí u homogenní kapaliny mezi molekulárními vrstvami značné síly a pro jejich odtržení je zapotřebí velkých napětí až 10^9 N/m^2 . Tuto vlastnost kapaliny nazýváme tahová pevnost vody, která závisí na teplotě a tlaku, je uvedena v grafu 4.1. Hodnoty byly zjištěny roztržením sloupce kapaliny v trubici, která se otáčela. Na tahovou pevnost má menší vliv i její vazkost, neboli viskozita. Jedná se o fyzikální veličinu udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při



Graf 4.1. Tahová pevnost vody [1]

proudění skutečné kapaliny. Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, to má za následek větší zpomalování pohybu kapaliny nebo těles v kapalině. Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu. Kapaliny s nenulovou viskozitou se označují jako viskózní (vazké).

Pevnost kapaliny závisí též i na frekvenci ultrazvukového pole. S rostoucí frekvencí se zvyšuje měrný výkon ultrazvukového pole potřebný k vyvolání kavitace.

Za předpokladu, že by existovala homogenní kapalina, by ke kavitaci vůbec nedocházelo, neboť by tato kapalina byla schopná přenášet tahová napětí, která vznikají při podtlaku nižším než je tlak nasycených par. V reálném světě však kapaliny, s kterými se můžeme setkat, nejsou zcela homogenní. Obsahují totiž i zcela nepatrné mikroskopické pevné částice a navíc i nerozpuštěné nebo rozpuštěné plyny. Veškeré tyto látky narušují a tím snižují pevnost molekulárních vrstev, takže reálná kapalina nedokáže přenášet tahová napětí. Z teorie roztoků však plyne, že



rozpuštěné plyny mají velmi malý, téměř zanedbatelný vliv na tahovou pevnost kapaliny. Na porušení homogenity kapaliny se největší měrou podílí právě nerozpuštěné nebo částečně rozpuštěné plyny a ty pevné částice, které jsou kapalinou špatně smáčivé. Tahová pevnost závisí mimo jiné také na velikosti a tvaru částic v kapalině. Nepatrné plynové bubliny v kapalině narušují její homogenitu a tím ztrácí vlastnost tahové pevnosti. Plynové bubliny v kapalinách jsou nejčastěji vyplněny vzduchem, který se dobře rozpouští. Vzduchové bubliny o malém průměru mají velký vnitřní přetlak, způsobený povrchovým napětím. Avšak přetlakem se zvyšuje rozpustnost plynů a velmi malé vzduchové bubliny by zanikaly a kapalina by byla homogenní. Toto vede k domněnce, že v kapalině jsou vždy určitá místa nestejnorodá, která narušují tahovou pevnost kapaliny a tvoří zárodky kavitace, čili kavitační jádra. U vody byla naměřena tahová pevnost $\sigma = 10^4 - 10^6 \text{ N/m}^2$, což odpovídá kavitačním jádrům velikosti $R_0 = (0,015 - 0,00015) \text{ mm}$.

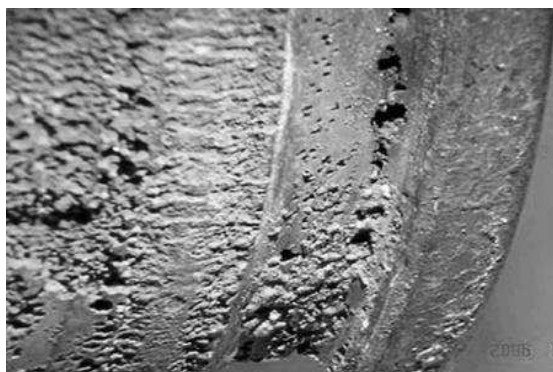
5. Účinky kavitace na materiál [1]

Rozrušení materiálu je závislé jak na vlastnostech materiálu, tak především na velikosti rázu při zanikání kavitační dutiny. Kavitační narušování se objevuje v místech zániku kavitační dutiny, což je na konci kavitačních oblastí. Nikdy tedy kavitační rozrušení materiálu nemůžeme pozorovat na počátku vzniku kavitace, např. na začátku lopatky lodního šroubu. V kavitaci, vzniklé odtržením proudu, jsou napadena nejvíce právě ta místa, kde se kavitační dutiny odtrhávají od povrchu. Velikost rázu je také závislá na velikosti dutiny, druhu kapaliny a teplotě.

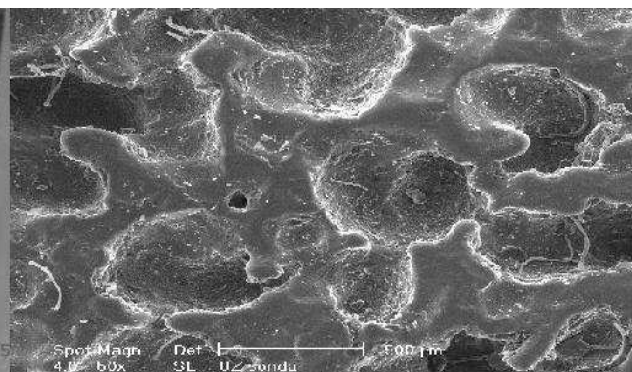
Kavitační rozrušování probíhá ve dvou stádiích. V prvním stádiu, tzv. inkubační době, se neprojevuje úbytek materiálu. Zatímco při úplném rozvinutí kavitačního rozrušení se materiál vydroluje a úbytek je doslova markantní. V inkubační době probíhají různorodé jevy např. změna velikosti krystalů krystalové mřížky narušovaného materiálu nebo vady krystalové mřížky.

Kavitační napadení zhoršuje v mikroskopických objemech materiálu jeho plastické vlastnosti, a tím zde vznikají přepětí. Tato přepětí mohou být tak velká, že převyšují mez pevnosti materiálu a nastává jeho narušování. Mechanické zpevnění materiálu proto nepřináší zvýšení kavitační odolnosti, protože materiál má menší schopnost plastické deformace. U materiálů, které mají heterogenní strukturu, tzn. obsahují nejméně dva typy krystalů, bývá zpravidla jeden schopný více odolávat kavitačnímu narušování díky lepším plastickým vlastnostem. V takovém případě podléhá jedna strukturní složka deformacím, na níž se rázy vyvolané zánikem kavitační dutiny tlumí, zatímco u druhé složky (pevnější a tvrdší) silové a rázové účinky nevyvolávají plastické deformace a dochází k vydrolování a vylamování. Tento průběh má zpočátku mikroskopický charakter, jelikož vyleštěný povrch odolává vylamování a vydrolování lépe jak povrch s velkou drsností. U materiálu s homogenní strukturou probíhá rozrušování povrchu jiným způsobem. I když se jedná o stejnorodou strukturu, tak v mikroskopickém světě jsou určité nestejnorodosti v orientaci krystalů. Krystaly ve struktuře nejsou orientovány a seřazeny ve stejném směru a to má za následek, že materiál v určitém jeho řezu je méně či více odolný ke kavitačnímu narušení. Tuto vlastnost si můžeme představit například tak, že pokud rozřízneme krychli materiálu příčně, podélně nebo úhlopříčně, tak nově vzniklé plochy budou mít rozdílnou odolnost proti kavitačnímu rozrušení.

Kavitační narušený povrch materiálů má charakteristický vzhled, který by se dal nejlépe popsat jako houbovitý tvar, jak můžeme vidět na obr.5.1 a obr.5.2.



Obr.5.1. Kavitační narušený povrch [4]



Obr.5.2. Detail narušené struktury [8]

6. Kavitační odolnost materiálů [1]

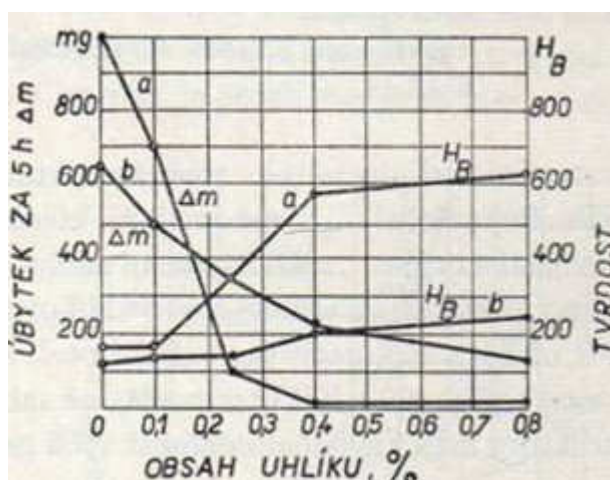
Vzhledem k poznatku, že kavitační ráz působí na velmi malé plošky, nerozhoduje o kavitační odolnosti mechanická vlastnost namáhaného materiálu, ale závisí na struktuře, vlastnostech zrn a na hranicích zrn. Při posuzování vlivu velikosti zrna na kavitační odolnost se názory liší, převládá však názor, že jemnozrnější struktura má vyšší odolnost vůči kavitačnímu narušení. Podle mikroskopických pozorování probíhá rozrušení buď po hranicích zrn a postupuje do hloubky nebo se šíří z hranic zrn dovnitř. Pokud postupuje kavitační rozrušení nejdříve po hranicích zrn a rozšiřuje se dovnitř zrna, tak je kavitační odolnost přímo závislá na délce hranic zrn. V tomto případě bude odolnost jemnozrnější struktury menší, protože délka hranic zrn je krátká a kavitační narušení bude postupovat větší rychlostí. V druhém případě, pokud bude kavitační rozrušení na hranicích zrn a bude-li se rozšiřovat do hloubky, bude docházet k vylamování zrn. Za těchto podmínek bude kavitační odolnost materiálu tím vyšší, čím bude jemnozrnější struktura, jelikož jednoduše řečeno, bude se muset vylomit více zrn.

Kavitační odolnost materiálu se měří v závislosti úbytku hmotnosti materiálu označovaného jako Δm na čase v hodinách nebo minutách.

6.1. Perlitické oceli [1]

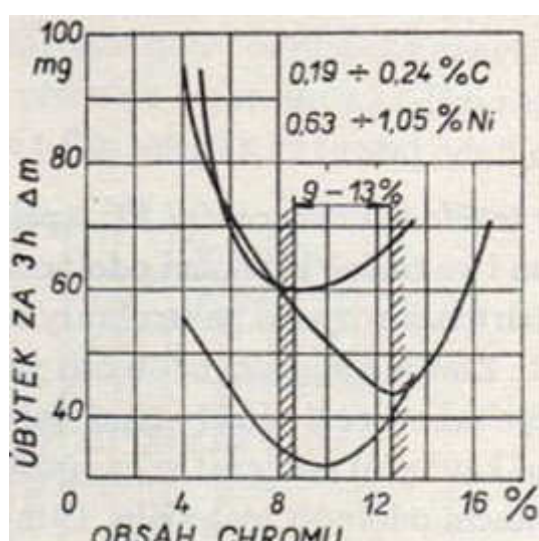
Při metalografickém zkoumání kavitačního rozrušení se ukázala jistá zákonitost v průběhu narušování. Kavitační odolnost závisí na druhu oceli a jejím tepelném zpracování.

Uhlík je základním prvkem, který se vyskytuje v oceli a určuje její mechanické a fyzikální vlastnosti. Kavitační odolnost se zvyšuje s rostoucím obsahem uhlíku jak u zakalených tak i u popouštěných ocelí. I když má větší obsah uhlíku příznivý vliv na kavitační odolnost materiálu, přesto je kavitační odolnost žíhaných ocelí docela nízká. Odolnost zmíněných ocelí nestoupá lineárně s jejich tvrdostí, která se s obsahem uhlíku mění jen velmi málo. Tuto zákonitost ukazuje graf 6.1.1.



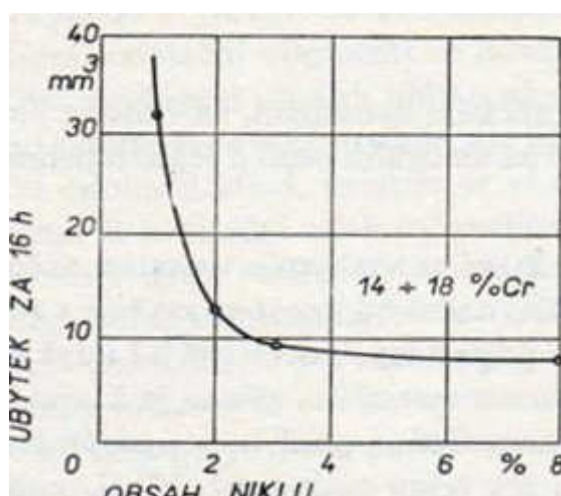
Graf 6.1.1. Vliv obsahu uhlíku na kavitační odolnost perlitické oceli, a-po zakalení, b-po žíhání [1]

Naopak vliv legujících prvků má příznivý vliv na zvýšení kavitační odolnosti. Například chrom a nikl má velmi kladný vliv. Avšak ne všechny legující prvky mají takto pozitivní vliv na odolnost. Do skupiny nepříliš prospěšných legujících prvků patří titan, molybden, vanad a wolfram. Vliv obsahu chromu na kavitační odolnost je porovnáván u ocelí z různých závodů, jak je znázorněno na grafu 6.1.2. Nejvyšší kavitační odolnost pozorujeme při obsahu chromu 9-13%. Větší obsah chromu způsobuje dvoufázovou strukturu austenitu a feritu. Taková struktura má menší kavitační odolnost, protože rozrušení vzniká na méně odolných zrnech feritu.



Graf 6.1.2. Vliv obsahu chrómu na kavitační odolnost perlitické oceli (ze tří výrobních závodů) [1]

Vliv obsahu niklu u ocelí s vysokým obsahem chromu zvyšuje kavitační odolnost materiálu. Avšak při obsahu větším jak 3%Ni se mění kavitační odolnost jen velmi málo, jak je ukázáno na grafu 6.1.3.

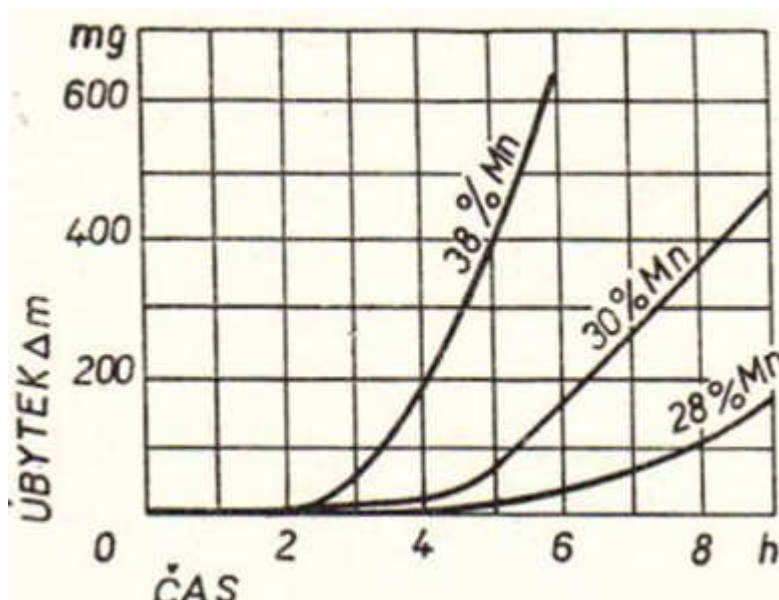


Graf 6.1.3. Vliv obsahu niklu na kavitační odolnost perlitické oceli [1]

6.2. Austenitické oceli [1]

Kavitačním účinkem se u austenitických ocelí vyvolávají plastické deformace a mechanická zpevnění povrchu. Tímto se austenitické oceli rozdělují na dvě základní skupiny vzhledem ke kavitační odolnosti. První skupinu tvoří oceli lehce zpevnitelné a druhou skupinu tvoří oceli s menší tendencí ke zpevnění. Například u manganového austenitu se dosahuje velkého zpevnění, ale u niklového austenitu zpevnění není tak znatelné. Při statických tahových zkouškách se prokázalo větší mechanické zpevnění než u niklových ocelí. Taktéž i změna tvrdosti při zpevnění je více patrná u manganových ocelí než u niklových.

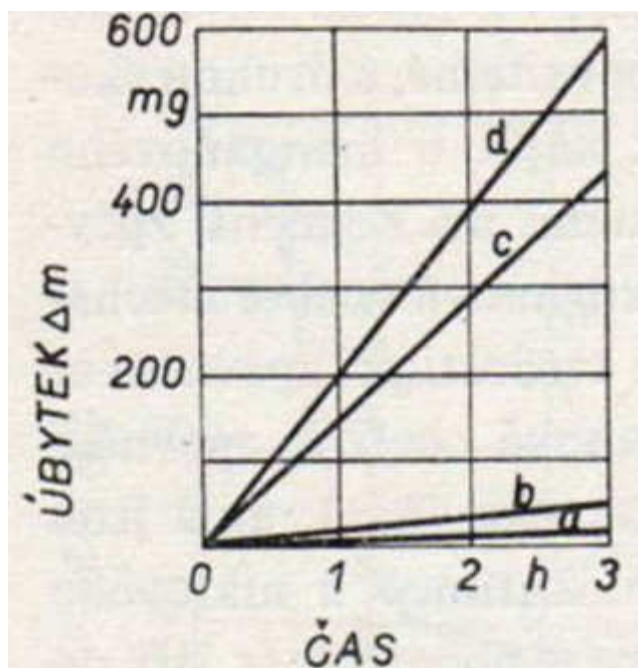
U austenitických ocelí legovaných manganem způsobuje kavitační účinek zpevnění, při kterém dochází k rozpadu austenitu na ϵ -fázi. Kavitační odolnost a zpevnění se mění podle obsahu manganu, který má vliv na přeměnu austenitu na ϵ -fázi, jak můžeme pozorovat na grafu 6.2.1. Čím je obsah manganu větší, tím je přeměna na ϵ -fázi menší a kavitační odolnost oceli se snižuje.



Graf 6.2.1. Vliv obsahu manganu na kavitační odolnost austenitické oceli [1]

Schopnost zpevnění deformacemi u austenitických ocelí závisí na obsahu uhlíku. Zkouškami bylo zjištěno, že kavitační odolnost austenitických ocelí manganových i niklových stoupá s rostoucím obsahem uhlíku až do 0,8%.

Rozdíly v kavitační odolnosti manganových a niklových ocelí (graf 6.2.2.) spočívají v nestejném stupni zpevnění a hloubce zpevněné vrstvy. U austenitických ocelí se při zpevnění deformacemi rozpadají tuhé roztoky za vzniku martensitu.



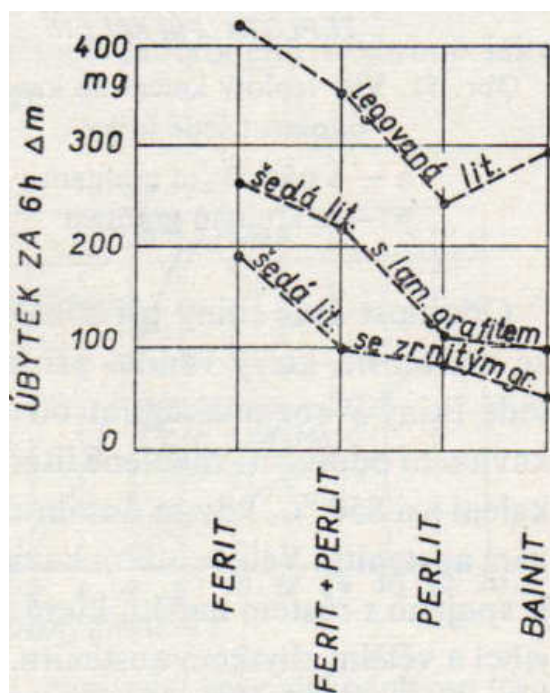
Graf 6.2.2. Kavitační odolnost austenitických ocelí, a,b-manganové oceli, c,d-niklové oceli [1]

6.3. Šedá litina [1]

Šedou litinu považujeme za heterogenní strukturu obsahující grafit, buď v podobě globulární, lamelární, pavoukovité či jiné. Odolnost vůči kavitačnímu rozrušení je velmi malá díky nízké pevnosti grafitu. Při kavitačním účinku se nejdříve vylamuje grafit a další rozrušení základního kovu litiny probíhá velmi intenzivně. Aby se snížil vrubový účinek způsobený rozrušením grafitu, je třeba dosáhnout ve struktuře vhodného tvaru grafitových částic. U lamelárního tvaru grafitových částic ve struktuře je jeho povrch relativně největší a tímto je koncentrace napětí v rozích grafitové částice velmi vysoká. Základní kov litiny je pak namáhán na tahovou pevnost. Naopak zrnitý grafit je mnohem kompaktnější, vyznačuje se menším povrchem než lamelární grafit a může se využít lépe pevnosti základního kovu litiny.

V šedé litině dochází již při malém zatížení k jisté deformaci materiálu, kde vrubovým účinkem dojde k zvýšení napětí. Opakovanými zatěžovacími cykly se objeví po určité době trhliny, které vedou ještě k větší koncentraci napětí a dochází k rozrušování materiálu. Můžeme říci, že kavitační odolnost litiny je určena tvarem, množstvím a rozložením grafitu na dané narušované ploše.

Velmi podstatný vliv na kavitační odolnost u litiny má její základní kov, tzv. matrice. Rozeznáváme několik základních matic a to feritickou, perlitickou, feriticko-perlitickou, bainitickou, sorbitickou a martenzitickou. Vlivy matrice základního kovu ukazuje graf 6.3.1.



Graf 6.3.1. Vliv matrice základního kovu na kavitační odolnost šedé litiny [1]

V neposlední řadě hraje velmi výraznou roli, jako i u jiných materiálů, při kavitační odolnosti litiny její tepelné zpracování. Při tepelném zpracování za teploty 350-650°C se odstraňuje vnitřní pnutí způsobené odlíváním. Ohřev při teplotách do 600°C nevyvolává podstatnou změnu a zvýšení kavitační odolnosti litiny. Avšak odolnost šedé litiny při zakalení značně stoupá, jelikož matrice je tvořena martenzitem, který má největší kavitační odolnost. Při zakalení litiny při teplotě 850°C je odolnost největší. Vzniká jehlicovitý martenzit s nejmenším zbytkovým austenitem. Při kalení nad teplotu 850°C paradoxně klesá kavitační odolnost litiny, protože tento průběh kalení má za následek zvětšení martenzitických jehlic a zvýšení obsahu zbytkového austenitu ve struktuře.

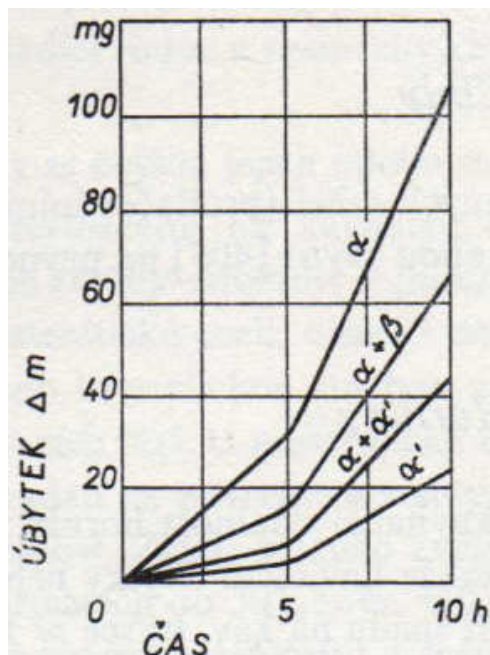
6.4. Slitina titanu [1]

Titan se vyznačuje vysokou pevností a korozivní stálostí v agresivním prostředí. Z těchto důvodů je v poslední době velká pozornost věnována právě slitinám titanu a jejich použití coby konstrukčních materiálů. Ve srovnání s oceli vykazuje titan téměř srovnatelnou kavitační odolnost jako chrom-niklové oceli. Kavitační odolnost titanu a titanových slitin však závisí především na chování

jednotlivých struktur při kavitačním narušování. Struktury titanu a jeho slitin můžeme rozdělit do tří základních skupin a to:

1. jednofázové struktury tuhých roztoků α a β
2. martenzitické struktury α a β -fáze
3. struktury směsí různých fází

Názorný přehled kavitačních odolností jednotlivých fází a dvoufázových struktur slitiny titanu je znázorněn v grafu 6.4.1.



Graf 6.4.1. Kavitační odolnost slitin titanu [1]

7. Zvýšení kavitační odolnosti [1]

Zvýšení kavitační odolnosti materiálu můžeme docílit povrchovým zpevněním např. kuličkováním, válečkováním nebo navařením. Dále pak i nanesením vrstev kovů a slitin, které lépe odolávají kavitačnímu narušování, nasycením vrstvy materiálu některými prvky anebo povrchovým zakalením.

7.1. Mechanické zpevnění materiálu [1]

Povrchové zpevnění se může vhodně provést u součástí, které jsou vystaveny jen jednomu typu namáhání, v našem případě kavitačnímu. Za předpokladu, že je součást vystavena dvěma typům namáhání, pak je možné volit povrchové zpracování takové, které nejlépe odolává především jednomu účinku.

Mechanické zpevnění plastickými deformacemi je nejvhodnější provádět u austenitických ocelí, kde dochází k velkému zpevnění a zvyšuje se kavitační odolnost. Je to způsobeno jak krystalovou stavbou austenitu, tak i tím, že se vlivem kavitačních rázů na povrchové vrstvy vytváří martenzit, který má dobrou kavitační odolnost. Takto zpevněné oceli se však nesmí nijak tepelně zpracovávat, to by mělo za následek rozpad martenzitu a snížení kavitační odolnosti.

7.2. Navařování a plátování [1]

Operace navařování se nejvíce využívá při opravách narušených povrchů kavitačním narušením. Při zavařování se používá materiál s vysokou kavitační odolností. Na základní materiál, který je bohatý na uhlík, se navaří vrstva nízkouhlíkovou elektrodou, která brání při navařování dalších vrstev nerezavějící oceli vniknutí uhlíku do svaru, což by mělo za následek křehkost vzniklého svaru. Tloušťka celkové navařené vrstvy se doporučuje u kavitovaného povrchu 2-3 mm. Při této metodě ochrany před kavitačním účinkem je velmi důležitá volba elektrody. Elektroda je vybírána dle základního materiálu, aby měla podobné chemické složení a svar byl kvalitní. Pro zkvalitnění svaru se taktéž používá metoda předehřívání svařovaného materiálu. Snižuje se tím riziko rychlého chladnutí svaru, které způsobuje vznik trhlin ve svaru.

Jinou možností, jak zvýšit kavitační odolnost základního materiálu, je plátování. Tenké pláty 2-3 mm jsou přivařeny na základní materiál a zvyšují jeho odolnost. Tato metoda ochrany s sebou však nese velké množství překážek. Jedním z hlavních problémů je kvalitní přivaření plátů na základní materiál. Pokud nejsou svary kvalitně provedeny, může kavitace probíhat pod plátem, což má za následek rychlejší narušení základního materiálu a celkové uvolnění plátů. Dalším velkým problémem je různá teplotní roztažnost materiálu plátu a základního materiálu. Tento problém se řeší vložením dalšího ocelového plátu mezi základní materiál a ochranný plát a tento vložený plát má velký součinitel roztažnosti. V neposlední řadě zde vystupuje další komplikace, kterou je kmitání. Vzniká při nedostatečném spojení plátů se základním materiálem.



7.3. Ochranné vrstvy [1]

V boji proti chemické a elektrochemické korozi u kovů se dosáhlo značného úspěchu díky nanesení tenké vrstvy odolného materiálu na povrch kovu. Objevily se tedy snahy tuto metodu použít i pro ochranu proti kavitačnímu narušování.

Lze však říci, že žádná z metod více či méně v boji proti kavitaci neuspěla. Veškeré povlakování například chromem nebo zinkem ve všech možných tloušťkách pouze prodloužilo inkubační dobu kavitačního narušování, a to vzhledem k ceně této technologie není vhodné řešení. Většího úspěchu se docílilo s povlakováním nekovovými materiály jako je guma a pryskyřice. U gumy kavitační narušování není tak rychlé, na povrchu se objeví pouze obrysy kavitačního narušení, ale kavitace nepostupuje do hloubky. Je zde spíše problém s vyřešením přilnavosti gumy na základní materiál. Při tomto řešení také odpadá problém s odlišnou tepelnou roztažností obou materiálů.

Pryskyřice byla poprvé použita v Energetickém ústavu v Lipsku (v bývalé NDR) při opravách kavitačně rozrušených ploch. Napadenou plochu vybroušením ještě o něco rozšířili a pak nanесли vrstvu umělé pryskyřice obohacenou o 30% práškového železa. Povrch se nebrousí, pouze po zatvrdnutí vyhladí.

Nekovové ochranné vrstvy dosud nenalezly v ochraně proti kavitačnímu narušování své místo, i když v přírodě se vyskytují kluzné povlaky ryb, které díky silnému tlumícímu účinku chrání povrch ryb proti účinkům kavitace.

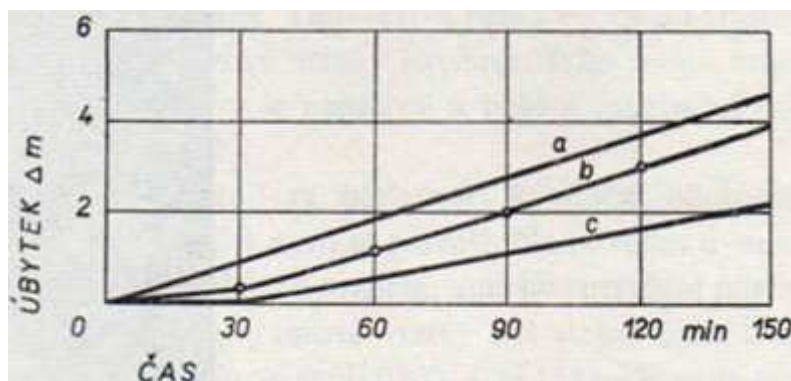
8. Ochrana proti kavitačním účinkům [1]

Snižování následků kavitace je velmi důležitou součástí celého problému kavitace. Je možné jí čelit, jak už bylo zmíněno v kapitole výše, přímými metodami jako je povlakování, zpevňování povrchu atd. nebo nepřímými metodami. Mezi tyto metody zahrnujeme např. elektrickou ochranu povrchu, který je vystaven kavitačnímu narušování nebo úpravu kavitačních vlastností samotné kapaliny.

8.1. Elektrická ochrana [1]

Použití elektrických ochrann se opírá o poznatek, že při kavitačním rozrušení byly zjištěny elektrické proudy jako součást elektrochemické koroze. Podnět k tomu daly pokusy Petracciho a Krennovy. Oba výzkumníci pracovali s nárazovým rotačním přístrojem (magnetostriční přístroj) a zjistili proudy u různých materiálů v závislosti na rychlosti nárazu.

Účinek elektrické ochrany na úbytek vzorku na magnetickostričním přístroji je patrný z grafu 8.1.1. Kompenzace elektrického proudu mezi vzorkem a pomocnou elektrodou snížila kavitační úbytek (křivka b). Protiproudem se dosáhlo dalšího snížení úbytku (křivka c). Průběh křivek úbytku ukazuje, že elektrická ochrana prodlužuje inkubační dobu kavitačního narušování povrchu materiálu. Ale jakmile se kavitační rozrušení vyvine, je tento druh ochrany neúčinný.

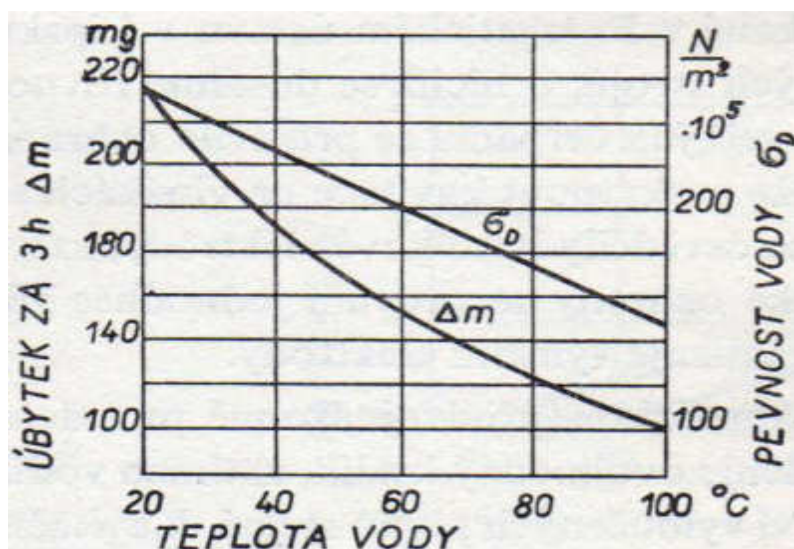


Graf 8.1.1. Vliv elektrické ochrany na kavitační úbytek, a-bez ochrany, b-kompenzace proudu, c-protiproud [1]

V českých kruzích se katodickou ochranou zabýval vědec Matěna na několika vodních centrálách, kde tato ochrana snížila kavitační rozrušení oběžných kol. Zdroj stejnosměrného proudu měl napětí 120-220V, ochranný proud dosahoval hodnoty až 4A. Došel k závěru, že soustředěním proudu do míst kavitačního napadení může dojít k elektrolýze vody a uvolněný vodík na povrchu lopatek pak tlumí mechanický účinek rázu při zániku kavitačních dutin. Tento typ ochrany proti kavitačnímu narušení závisí také na proudové hustotě a jejím rozložení. Pokud je rozložení proudové hustoty nerovnoměrné, ochrana ztrácí na účinku. Proudová hustota elektrické ochrany v kavitaci je několiknásobně vyšší než u elektrické ochrany potrubí proti korozi.

8.2. Úprava kapaliny [1]

Kapalina se může v závislosti na deformační rychlosti chovat jako křehký materiál nebo jako materiál vazký. Mechanické roztržení kapaliny závisí na napětí, při kterém se poruší spojitost kapaliny. Kavitace narušuje spojitost kapaliny, a proto vznik kavitace je určen právě pevností kapaliny. Tato vlastnost kapaliny závisí na několika činitelích jako je teplota, povrchové napětí, obsah plynů a v neposlední řadě i tlak. Pevnost kapaliny v závislosti na teplotě má vliv na kavitační rozrušení materiálu, což můžeme pozorovat na grafu 8.2.1.



Graf 8.2.1. Změna tahové pevnosti vody a kavitační úbytek oceli s teplotou [1]

Při nízké pevnosti kapaliny se tvoří velké množství bublin, které svým tlumícím účinkem snižují kavitační napadení. S rostoucí pevností se počet bublinek zmenšuje, avšak při zániku se rázový účinek zvyšuje, až dosáhne při určité hodnotě maxima kavitačního rozrušení. Dalším zvyšováním pevnosti kapaliny se vznik kavitačních bublin značně ztěžuje. I když jejich rázový účinek při zániku stoupá, je kavitační rozrušení menší.

Na vznik kavitačních bublin má též podíl povrchové napětí. Čím menší je povrchové napětí, tím je zapotřebí méně energie při vzniku kavitačních bublin. Případná úprava povrchového napětí kapaliny má smysl jen u uzavřených hydraulických soustav, jako např. chladicí systémy spalovacích motorů. Tato úprava kapaliny totiž spočívá v přidání speciálních látek do vody. Příznivý účinek přísad v kapalině se projevuje jednak zhoršením vzniku a růstu bublin a také vytvářením adsorpční vrstvy, která tlumí kavitační ráz. Tyto jevy mají za následek prodloužení inkubační doby kavitačního rozrušení, nezabrání však kavitaci jako takové.

9. Vodní turbíny [13] [14]

Vodní turbína je točivý mechanický stroj, který přeměňuje kinetickou či tlakovou energii vody na mechanickou energii. Předchůdcem vodní turbíny bylo vodní kolo (známé také jako mlýnské kolo). Spolu s elektrickým generátorem resp. alternátorem spojeným s turbínou je hlavní součástí vodních elektráren. Generátor převádí mechanickou energii turbíny na energii elektrickou.

Vodních turbín je několik typů, dělí se na dva základní typy a to na přetlakové a rovnotlaké. Nejznámějším reprezentantem rovnotlaké turbíny je Bankiho, můžeme jí přirovnat pro jednoduchost k mlýnskému kolu. Mezi přetlakové turbíny patří Kaplanova, Francoisova a Peltonova turbína.

Provoz vodních turbín, jakožto i čerpadel, je spojen s negativním fyzikálním jevem kavitace. U vodních turbín se na výstupu začleňují do celého hydraulického systému tzv. savky (o jednotlivých účelech savky pojednává kapitola 9.1.). Začleněním savky do hydraulického systému turbíny se snižuje tlaková hladina ve všech místech průtoku kapaliny. Uvnitř kanálů oběžného kola na lopatkách může tlak poklesnout pod hodnotu napětí syté páry p , což vytváří podmínky ke vzniku kavitace.

Kavitaci, která se vyskytuje jen u kapalin, je nazýván vznik parních bublin, jejichž růst i rychlá kondenzace doprovázena tlakovým rázem. Vytváření dutin počíná obecně vždy na stěně lopatky a skříně. Existence parních bublin je nestabilní, takže v místech opětového zvýšení tlaku nad napětí syté páry dochází k jejím zánikům. Jev vzniku a zániku bublin probíhá s vysokými frekvencemi až 100 Hz, přičemž zánik s hydraulickým rázem vyvolává kavitační erozi zařízení.

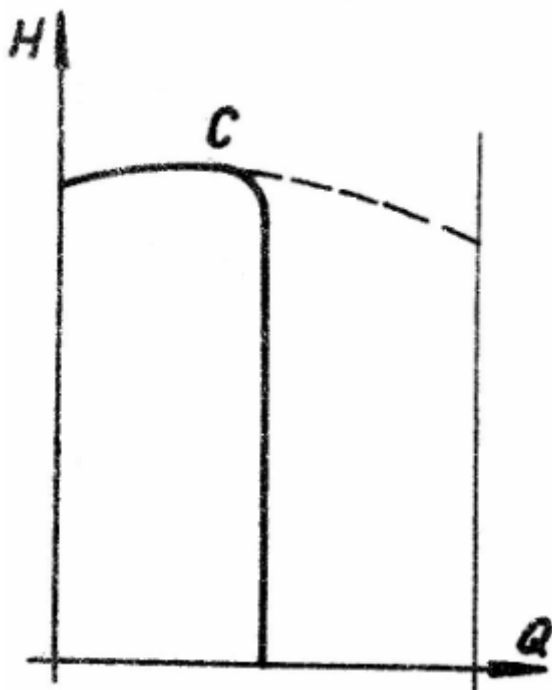
Kavitační jevy jsou doprovázeny třaskavým hučením a chvěním. Účinnost transformace energie klesá až o 20%, mnohdy i v krátkém čase dochází k zničení poškozených částí turbín i čerpadel. K zamezení těchto jevů je nezbytné omezit výšku savky H_s (vztah 9.1.), a tím také její negativní vliv na provoz turbíny. Výška savky je omezoována Thomovým kavitačním koeficientem σ_t uplatněním vztahu:

$$H_s \leq \frac{p_B - p''}{\rho \cdot g} - \sigma_t \cdot H_B \quad (\text{m}) \quad 9.1.$$

Hodnota kavitačního součinitele (vztah 9.2.) závisí na změně tlakového a rychlostního profilu v kanálech oběžného kola a na změně ztrát způsobujících pokles tlaku. Určuje se pro každý typ kola podobných strojů na modelech v kavitačním tunelu, i když zpravidla u díla dochází ke kavitaci dříve než u modelu.

$$\sigma_t = \frac{P_\infty - P_{np}}{\rho \cdot \frac{v_\infty^2}{2}} \quad 9.2.$$

U čerpadel při vzniku mírné kavitace může dojít k malému zvýšení účinnosti o 1 až 2%, neboť pára zmenší tření po lopatkách. Intenzivní kavitace však poruší proudění v oběžném kole a dojde ke zhroucení účinnosti. Tento jev můžeme pozorovat na charakteristické křivce čerpadla Q - H náhlým poklesem pracovní výšky (graf 9.3.).



Graf 9.3. Náhlý pokles pracovní výšky [14]

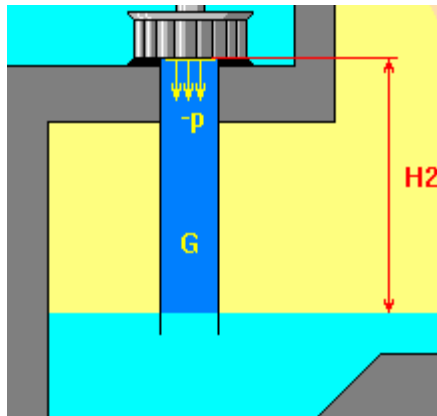
Je pochopitelné, že v provozu nesmí ke kavitaci dojít. Jen u velkých čerpadel (přečerpávajících elektráren) jež mají nátok, někdy připouštíme menší projev kavitace oběžného kola. V tomto případě však musí být při návrhu kola věnovaná značná pozornost volbě vhodného, kavitačně odolného materiálu.

U čerpadel dochází ke kavitaci při zavřeném výtlaku téměř vždy v důsledku lokálního víru v kanálech oběžného kola. Projevuje se to silným hlukem čerpadla. Proto, jakož i z důvodu ohřívání vody, nesmí čerpadlo dlouho běžet bez čerpání.

9.1. Savka turbíny [15]

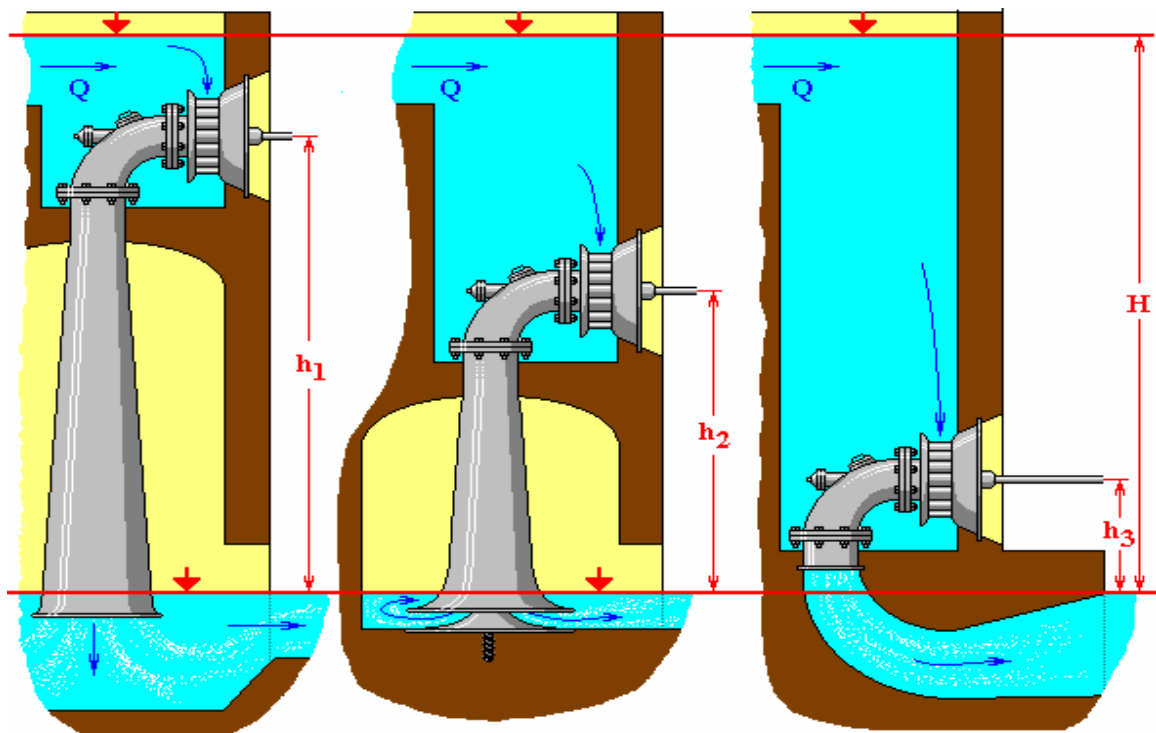
Sací roura nebo zkráceně savka je pojmem vyskytujícím se většinou v souvislosti s přetlakovými turbínami. U turbín rovnotlakých mluvíme o odpadním potrubí. Pouze tehdy, je-li za oběžným kolem sloupцем vody vytvořený podtlak, hovoříme o savce. Ačkoliv skutečným otcem savky je německý technik Henschel, její přednosti naplno vynikly až u turbíny Francisovy. Díky savce bylo možno umístit turbínu téměř v libovolné výšce nad spodní hladinou (až do mezí daných kavitací). Stroj tak mohl být snáze přizpůsobený potřebám provozovny i dané lokalitě. Často odpadly složité převody a částečně se eliminovalo nebezpečí zatopení strojovny. To byl jeden ze zásadních důvodů, který způsobil rychlé rozšíření Francisovy turbíny do celého světa.

Hydrostatický účinek savky (obr. 9.1.1) spočívá v tom, že savka spojuje odtokovou stranu turbíny se spodní hladinou. Protože byla po prvním spuštění turbíny zcela vyplněna vodou, choval se v ní sloupec kapaliny G spojitě. I při zavřené turbíně zůstával v savce viset. Turbína za provozu zpracovávala přetlak od horní hladiny po oběžné kolo i podtlak $-p$ vzniklý působením sloupce o výšce H_2 od oběžného kola ke spodní hladině (sloupec vody v savce táhl stejně, jako když se stáčí víno)



Obr. 9.1.1. Hydrostatický účinek savky [15]

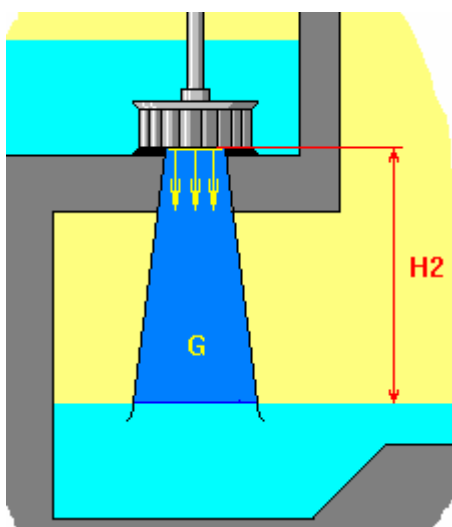
V praxi už není nutno umisťovat oběžné kolo bezprostředně nad spodní hladinu jako u starších typů turbín. Dokonce turbína nemusí mít svislý hřídel. I když je stroj vodorovně, je možno vodu odvádět kolenem. Kolenová savka umožnila v minulosti téměř libovolnou stavební výšku při též spádu (obr. 9.1.2.)



Obr. 9.1.2. Různé výšky hřídele nad spodní hladinou [15]

Jednoduché stavební řešení bylo však jen zlomkem pokroku, který použití savky přineslo. Nejdůležitější její funkce spočívá ve využití vodní energie, která by jinak zůstala nevyužitou (obr. 9.1.3.). Voda opouští oběžné kolo poměrně velkou rychlostí. Protože se již dostala mimo dosah lopatek, je tato zbytková energie zdánlivě nevyužitelná. Nikoliv však, použijeme-li za oběžným kolem rozšiřující se savku. Odpadní voda proudící kuželem je nucena zaujímat čím dál tím širší průřez. V širším průřezu kapalina proudí nižší rychlostí a setrvačné zrychlení ji udržuje v pohybu. Voda se chová jako neviditelný píst a projevuje se tím, že za odtékající kapalinou vzniká výrazný podtlak, který se přenáší sloupcem vody zpět až na lopatky oběžného kola.

Pro turbínu je tento podtlak totéž, jako by spodní hladina stála níž než ve skutečnosti je. Přeměna pohybové energie na tlakovou se v savce řídí Bernoulliho rovnicí. Účinnost této přeměny u přímých savek dosahuje 70 až 90% a u savek kolenových 60 až 85%.



Obr. 9.1.3. Hydrodynamické využití savky [15]

Za běžným kolem je tedy podtlak způsobený nejen tím, že je turbína v určité výšce nad spodní vodou, ale sčítá se s podtlakem vznikajícím zpomalením vody v savce. Při velkých výtokových rychlostech z oběžného kola (zejména u Kaplanových turbin) může být tento podtlak značně velký a může být často jednou z příčin kavitace.

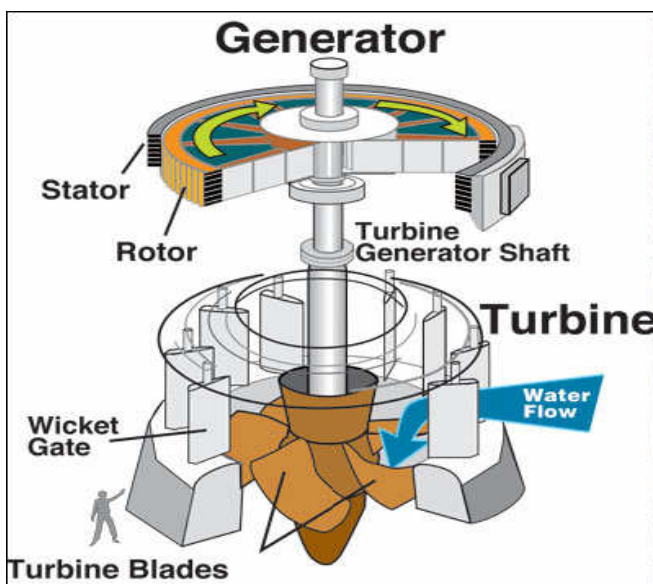
Čím rychloběžnější je turbína, tím větší rychlostí opouští voda její oběžné kolo. Tím by také byla větší ztráta, kdyby za oběžným kolem savka nebyla. Proto pro většinu moderních přetlakových turbin je savka naprostou nezbytností, zaručující jejich dobrou účinnost.

9.2. Kaplanova turbína [11]

Kaplanova turbína (obr.9.2.1) je přetlaková axiální turbína s velmi dobrou možností regulace. Toho se využívá především v místech, kde není možné zajistit stálý průtok nebo spád.

Turbínu vynalezl profesor brněnské techniky Viktor Kaplan. Od svého předchůdce, Francisovy turbíny, se liší především menším počtem lopatek, tvarem oběžného kola (obr. 9.2.2) a především možností regulace náklonu lopatek u oběžného i rozváděcího kola. Má vyšší účinnost než Francisova turbína, je ale výrazně složitější a dražší. Používá se pro spády od 1 do 70,5 m (což je spád na vodní elektrárně na Orlíku) a průtoky 0,15 až několik desítek $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Největší hlnost na světě mají Kaplanovy turbíny na vodní elektrárně Gabčíkovo na Dunaji a to až $636 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, při spádu 12,88 – 24,20 m. Obecně se dá říci, že se používá především při velkých průtocích a malých spádech, které nejsou konstantní.

Kaplan jako první vzal při teoretickém návrhu turbíny v úvahu vazkost vody. V letech 1910-1912 proto navrhl na základě svých úvah nový tvar oběžného kola. První prototyp Kaplanovy turbíny byl vyroben brněnskou firmou Ignác Storek v r. 1919. Po zkouškách se ukázalo, že turbína dosahuje vynikající mechanické účinnosti až 86%. Další prototyp byl úspěšně vyzkoušen v poděbradské elektrárně. Později, když se Kaplanovým žákům podařilo vyřešit i problémy s kavitací, se tato turbína stala nejvýznamnějším typem turbíny užívaným ve velkých vodních elektrárnách po celém světě. Začátkem jejího úspěchu byla úspěšná montáž tehdy největší turbíny světa ve švédském Jlla Edet v r. 1925.



Obr. 9.2.1. Kaplanova turbína [12]



Obr. 9.2.2 Oběžné kolo [12]

9.3. Francisova turbína [11]

Francisova turbína (obr. 9.3.1) je podtypem vodní turbíny, vyvinuté James B. Francisem. Jedná se o přetlakovou turbínu. Francisova turbína má dvě podvarianty podle uložení hřídele:

- Vertikální
- Horizontální

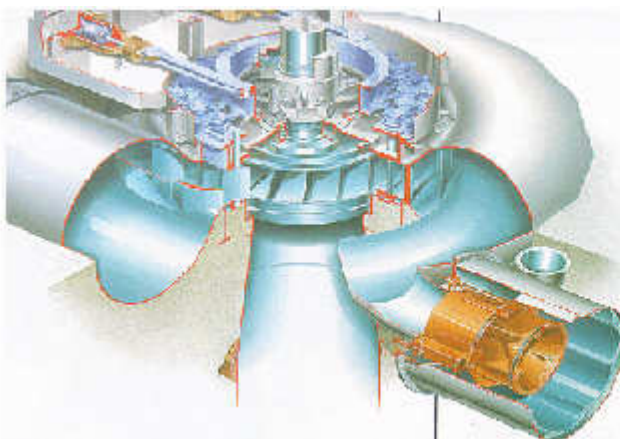
Francisovy turbíny patří mezi nejpoužívanější. Používají se pro produkci elektrické energie. V minulosti často používané vodní kolo sloužilo jako pohon pro mlýny nebo hamry. Jeho nevýhodou byla nedostatečná efektivita. V 19. století se podařilo jeho efektivitu zvýšit natolik, že vodní turbína mohla úspěšně soupeřit s parním strojem.

V r. 1826 Benoit Fourneyron vyvinul vysoce efektivní (80%) vodní turbínu. Voda byla směřována tangenciálně turbínou a tím ji roztáčela. V r. 1848 James B. Francis vylepšil tyto předchozí turbíny a podařilo se mu dosáhnout celkové 90% efektivitu. Samozřejmě na efektivitu má vliv i údržba turbíny, především údržba oběžného kola, které bývá napadeno kavitacním rozrušením. Příklad špatné údržby a činnosti v nedoporučených otáčkách můžeme vidět na obrázku 9.3.2.

Francisova turbína patří mezi přetlakové, což znamená, že pracovní kapalina mění tlak během své cesty strojem. Přitom odevzdává svou energii. Pro udržení toku vody jsou nutné rozváděcí lopatky. Rotor turbíny se nachází mezi vysokotlakým přívodem a nízkotlakou savkou většinou v patě přehrady.

Vstupní potrubí se postupně zužuje. Pomocí rozváděcích (automaticky stavěných regulátorem) lopatek je voda směřována na rotor. Jak voda prochází rotorem, její rotační rychlost se zmenšuje a zároveň odevzdává energii rotoru. Tento efekt (spolu s působením samotného vysokého tlaku vody) přispívá k efektivitě turbíny. Výstup z turbíny savka, je tvarován tak, aby byla rychlost výstupní vody co nejnižší.

Používá se pro střední a větší průtoky a spády. Jsou časté zejména u přečerpávacích elektráren. Například největší evropská přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně používá dvě Francisovy turbíny o výkonu 325 MW.



Obr. 9.3.1. Francisova turbína [12]



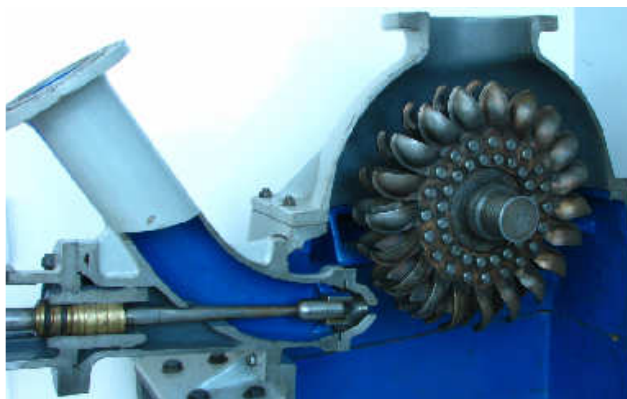
Obr. 9.3.2. Kavitací rozrušené lopatky rotoru Francisovi turbíny [10]

9.4. Peltonova turbína [11]

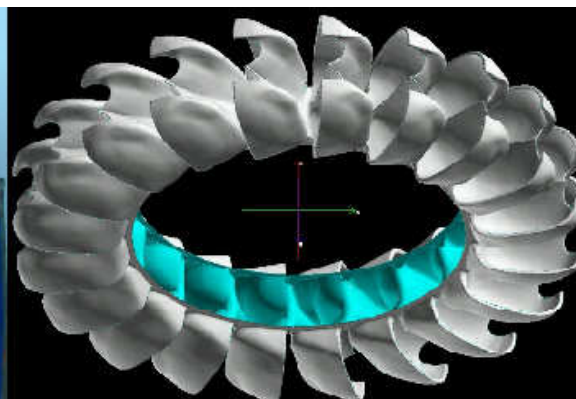
Peltonova turbína (obr. 9.4.1) je tangenciální rovnotlakou turbínou. Voda proudí tečně na obvod rotoru pomocí trysek. Rozvaděčem je dýza na přívodním potrubí, z níž voda vystupuje kruhovým paprskem a dopadá na lopatky rotoru, které mají lžičkovitý tvar (obr. 9.4.2.). Každá z lopatek se postaví proti směru toku vody a tak otočí její směr. Výsledkem vzniklých sil je pohyb rotoru turbíny. Peltonova turbína je nejeftektivnější v případě vysokého tlaku přívodní vody. Jelikož voda je jen obtížně stlačitelná, téměř všechna její energie je předána turbíně. Proto stačí pouze jediné oběžné kolo k převedení energie vody na energii rotoru.

Průtok vody a tím i výkon turbíny se reguluje změnou výtokového průřezu dýzy zasouváním regulační jehly. K posuvu jehly se většinou používá servomotor. Rychlý zásah regulace – snížení výkonu – se provádí odkloněním vodního paprsku.

Peltonovy turbíny se používají pro vysoký spád vody a malý průtok. Jsou vyráběny ve všech možných velikostech. Pro použití v energetice se využívá vertikální uložení a výkon až 200 MW. Nejmenší turbíny jsou veliké několik desítek centimetrů a používají se pro malé vodní elektrárny s velkým spádem. Rozsah použití je od 15 m až po 1800 m.



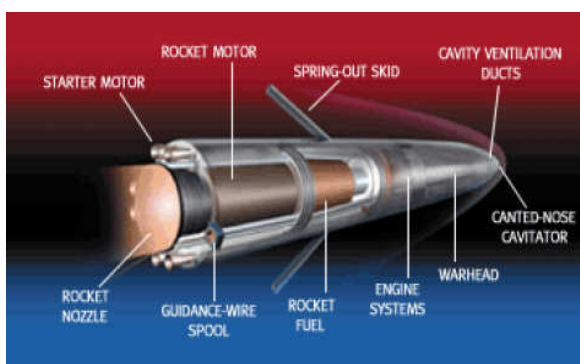
Obr. 9.4.1. Peltonova turbína [12]



Obr. 9.4.2. Rotor Peltonovi turbíny [12]

10. Superkavitace [3]

Jedná se taktéž o fyzikální jev, v podstatě jde o kladné využití kavitace při pohybu těles v podvodním světě. Hlavní myšlenkou je vytvoření protáhlé, homogenní kavitační bubliny, která by obklopovala co největší část tělesa pohybujícího se pod vodou. Tuto myšlenku zhmotnil v roce 1977 vedoucí ruského podmořského vývojového centra Maršál P.Tulin, když vyvinul první super rychlé torpédo s názvem „Škval“ (Bouře) (obr.10.1.) a (obr.10.2.). Toto torpédo je schopno pohybovat se pod vodou až rychlostí 100 m/s. Současná podmořská torpéda dosahují rychlosti asi 20 m/s. S přihlédnutím k faktu, že voda má 1000x hustší prostředí jako vzduch, jsou tyto prvotní dosažené rychlosti obrovské.



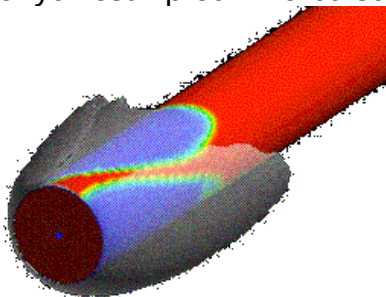
Obr. 10.1. Ruské torpédo Škval [3]

Obr.10.2. Škval v superkavitační bublině [3]

10.1. Základy superkavitace [3]

Jak již bylo zmíněno, hlavní myšlenkou je obklopení tělesa, pohybujícího se pod hladinou, souvislou a co největší bublinou, která zabraňuje styku tělesa s vodou. Tímto se v podstatě dané těleso nepohybuje ve vodním prostředí, ale ve vzduchové kapse. Není tedy v kontaktu s okolní vodou a nepůsobí na těleso třecí síly od vody, ale pouze od vzduchu nebo plynu, který je obsažen v bublině.

Konstrukční řešení je provedeno tak, že na špičce např. torpéda, které je v přímé interakci s vodním prostředím, jsou trysky, kterými je vypouštěn vzduch ze vzduchových kapslí umístěných vně torpéda. Při pohybu vpřed, který je zajišťován pohonem umístěným v zadní části torpéda, vzduch nepřekoná tlak okolní vody a je nucen k obtékání tělesa. To vytváří protáhlou bublinu elipsoidového osově symetrického tvaru. Tento plynný obal zasahuje do zadní části torpéda v závislosti na jeho rychlosti vpřed. Tvorbu superkavitační bubliny ukazuje obr.10.1.1.



Obr.10.1.1. Simulace tvorby superkavitační bubliny [3]

10.2. Budoucí využití superkavitace [3]

Tradičním využitím superkavitačního jevu bude jistě vojenský průmysl. Už tyto první torpéda, stará více než 30 let, mají oproti konvenčním torpédům naprosto destruktivnější účinky díky své velké rychlosti. Možná i konvenčním obřím atomovým ponorkám již zvoní hrana, i když v dnešním světě představují velice silnou a dominantní zbraň. Světová velmoc, která jimi disponuje na moři, má vždy téměř absolutní převahu. Ale jak by se bránila tato velká nemotorná ponorka proti malým, jakýmsi létajícím podvodním letadlům, která by se pohybovala v kavitační bublině a vystřelovala by malé superkavitační projektily?

Tato myšlenka není tak bláznivá a nesmyslná, jak se může na první pohled zdát. Právě výzkumem superkavitačních zbraní a plavidel se zabývá americká armáda a vize rychlých podmořských strojů začíná být do budoucna reálnější. V dnešní době je již ve zkušebním provozu dělo, které vystřeluje superkavitační náboje (obr.10.2.1.) a tyto projektily se v podvodním světě chovají téměř se stejným průběhem balistické křivky jako střely létající na souši.



Obr.10.2.1. Superkavitační projektil RAMICS vyvinutý pro americké námořnictvo ve společnosti C Tech Defense. [3]

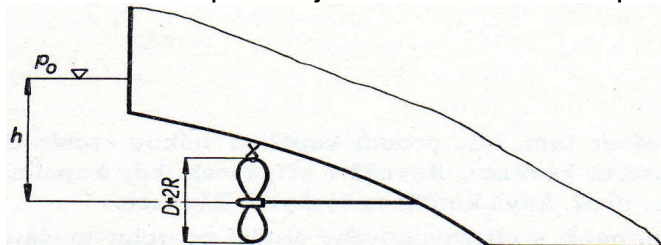
Ale je zde i jiná možnost využití, a to právě civilní oblast. V dnešní hektické době by jistě lidstvo uvítalo možnost námořní plavby, která by byla mnohem rychlejší než je dosud. Představme si možnost cesty např. z Francie do New Yorku za desetinový čas, možná i rychleji, a to díky superkavitační dopravě.

Můžeme se jen zamyslet nad budoucím využitím superkavitačního jevu. Jsou možná mnohá a barvitá využití tohoto kladného jevu a lidstvo znovu prokázalo svoji zarpulitost, zvědavost a schopnost obrátit destruktivní fyzikální jev ve svůj prospěch.

11. Kavítace lodních šroubů [1]

Jedná se o kavítaci velmi rozšířenou s opět destruktivními účinky na materiál šroubu. Proti kavítaci u lodních šroubů se velmi obtížně brání, nelze zde použít ochranu zavzdušněním jako např. u čerpadel nebo vodních turbín, jelikož by přiváděný vzduch unikl do okolního vodního prostředí.

Na vznik kavítace u lodních šroubů má podstatný vliv ponor šroubu h a jeho průměr D . U lodních šroubů se rozlišuje několik druhů projevu kavítace, která závisí na provozních podmínkách. Můžeme zde rozlišit například projev kavítace jako souvislé kavitační vlákno, které vzniká až za místem X (Obr.11.1.), nebo již zmíněné kavitační vlákno bude vznikat na profilu lopatky. Dále může nastat i případ, kdy se projeví plošná kavítace na podtlakové straně lopatky lodního šroubu. Dále vznik, druh a projev kavítace závisí jak na povrchu lopatky, tak i na profilu lopatky. Například při malých rychlostech může pracovat lopatka s malým negativním úhlem náběhu, a to způsobuje kavítaci odtržením proudu na přední (náběhové) hraně.



Obr.11.1. Schéma lodního šroubu [1]

Protože kavitační napadení materiálu vzniká až na konci kavitační oblasti, kde zanikají kavitační dutiny, je možné se u lodních šroubů vyhnout kavitačnímu účinku na materiál. Nejedná se o řešení snížením otáček lodního šroubu, to je sice možné řešení, ale nepříliš sofistikované. Řešení spočívá v zániku kavitačních dutin až za nábojem šroubu. Kavítace se tedy sice na lopatkách lodního šroubu vyskytne, putuje po lopatce, ale zanikne až v bezpečné vzdálenosti za šroubem. Takové stádium kavítace se také nazývá superkavítace.

Kavítace u lodního šroubu (obr.11.2.) je považována za jev nežádoucí, bohužel během mnohaletého výzkumu tohoto problému se zatím neobjevilo řešení, které by zcela odstranilo problémy spojené s projevem kavítace na lodních šroubech. Kavitací postihnutý lodní šroub má menší účinnost, projevuje se větší hluk a vibrace celé soustavy.



Obr.11.2. Kavítace na lopatkách lodního šroubu [10]

12. Ultrazvuková kavitace [2]

Pod pojmem ultrazvuková kavitace se rozumí aktivní projevy kmitajících plynových bublin v kapalině, kterou prochází ultrazvukové vlnění. Představme si ultrazvuk jako periodické změny okamžitého tlaku v kapalině, který by za klidových podmínek v daném prostředí panoval. Při určité amplitudě těchto tlakových kmitů dochází k tomu, že přítomné malé plynové bubliny začínají radiálně kmitat nelineárně, tj. nesinusově.

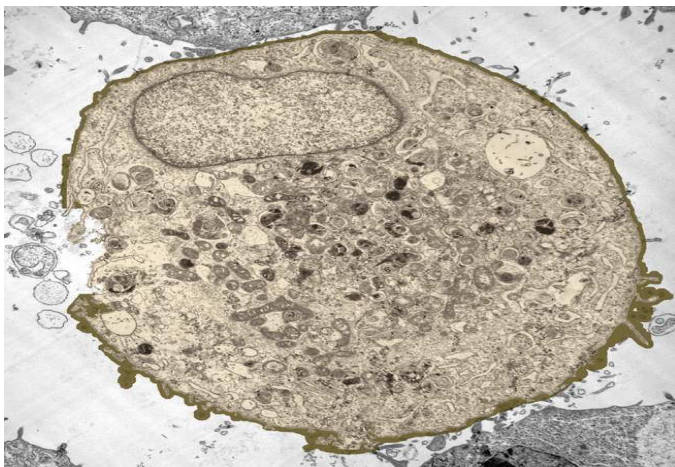
Impulsní režim aplikace ultrazvuku zesiluje kavitační jevy, je-li délka trvání impulsu dostatečně dlouhá k tomu, aby se kavitace mohla rozvinout. U velmi krátkých impulsů hraje významnou úlohu to, zda začínají kladnou či zápornou tlakovou vlnou. Pravděpodobnost rozvoje kavitace se zvyšuje ve druhém případě.

Na ultrazvukovou kavitaci má velký vliv i teplota. Kavitační práh je závislý na teplotě jak v důsledku ovlivnění kavitační nukleace, tak i v důsledku akustických i jiných fyzikálních změn prostředí. Snížená teplota má na kavitaci spíše tlumivý efekt, zatímco vyšší teplota kavitační jev indukuje.

12.1. Využití ultrazvukové kavitace v chirurgii [2]

Chirurgické aplikace ultrazvuku se opírají jak o jeho tepelné účinky, tak o destrukci tkáně způsobenou kavitačními jevy. Často se tyto mechanismy uplatňují společně. Kavitace zvyšuje absorpci akustické energie, a tím i asi dvojnásobný vzrůst teploty za stejných podmínek.

Mezi chirurgické aplikace ultrazvuku řadíme i ultrazvukovou hypertermii¹, kdy se ultrazvuk o vyšší intenzitě používá pro odstraňování zhoubných nádorů a jiných chorobných ložisek. Buňky v místě aplikace jsou zcela usmrceny rozvrácením metabolismu. Prvotní narušení buněčného obalu nádoru prostaty ultrazvukovou kavitací můžeme vidět na obr. 12.1.1. Snímek je pořízen z elektronového mikroskopu a pro zvýraznění narušení je obvod buňky hnědě kolorován.



Obr. 12.1.1. Narušení buněčného obalu nádoru prostaty ultrazvukovou kavitací [6]

¹ Stav zvýšené teploty organismu vyvolaný poruchami termoregulace, vznikající z přehřátí.

12.2. Využití ultrazvukové kavitace k liposukci [10]

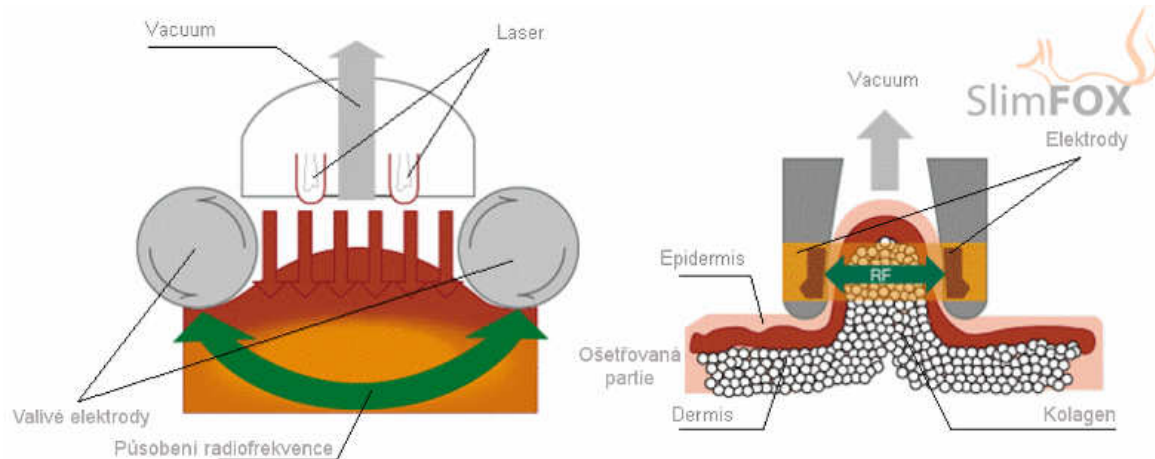
Liposukce, neboli odsávání tuku je operace, při které je z různých míst lidského těla odsáván přebytečný tuk. Uplatňuje se především v kosmetické chirurgii a také v boji s obezitou. Relativně moderní techniky konturování lidského těla a odstraňování tuku začínají poprvé v roce 1926 s francouzským chirurgem Charlesem Dujarierem. Avšak tragický případ, který vyústil v gangrénu a pozdější amputaci nohou francouzské modelky Mademoiselle Geoffre zmrazil veškeré zájmy o úpravu a tento typ zásahu do lidského těla na několik desetiletí. Moderní liposukci uvedl na scénu až další francouzský chirurg dr. Yves-Gerard Illouz v roce 1982.

Navzdory neslavným začátkům metody liposukce se tato metoda úpravy lidského zevnějšku stala vyhledávanou chirurgickou procedurou v novém tisíciletí. Výzkum i vývoj v této oblasti se také rozvíjí a zdokonaluje.

Nejnovější metodou zavedenou v roce 2009 v chirurgii je tzv. neinvazivní (nedochází k penetraci do lidské tkáně) ultrazvuková kavitační metoda. Jde o převratnou technologii v tomto oboru, kdy výsledky liposukce jsou znatelné ihned po aplikaci a veškeré tukové buňky a tkáně jsou nenávratně odstraněny, tedy touto metodou získáváme trvalých výsledků.

Ošetření je založeno na působení nízkofrekvenčního ultrazvuku spojeného s vakuem, čímž se zásadně ve svých vlastnostech odlišuje od jiných ultrazvukových a dalších liposukčních technologií. Ultrazvuk o frekvenci 40 KHz způsobuje uvnitř tukových zásob ošetřované oblasti vznik mikrobublinek, které se rozpínají a stále zvětšují až explodují. Tím vzniká tzv. rázová vlna jako hlavní efekt, která rozbije tukové tkáně, která je transportována do tkáňového moku a odváděna lymfatickým systémem z těla ven. Kavitační technologie umožňuje koncentrované energii nasměrovat do velmi specifické zóny uvnitř pacienta a je tak schopna rozvrátit podkožní tukové buňky, přičemž nechává kůži, vaskulární, nervovou a muskulární tkáň nezměněnou.

Nová technologie kavitace s vakuem poskytuje řadu výhod. Vakuum znásobuje působení na kůži, stiskne ji pevně na aplikátor a tím poskytuje vysoce selektivní a bezpečného zacházení (obr. 12.2.1.). Tato kombinace zajišťuje, že účinek kavitace zvyšuje působení pouze na podkožní tukové tkáně. Díky neustálému tlaku na kůži se zvyšuje účinnost ošetření, a přináší vynikající výsledky. A v neposlední řadě se riziko náhodného působení ultrazvuku snižuje na minimum.



Obr. 12.2.1. Nová technologie kavitace s vakuem a podstata této metody [10]

Po zničení tukové tkáně, tuk ve formě triglyceridu je vypouštěn do intersticiální tekutiny mezi buňkami, kde jsou enzymaticky metabolizovány do glycerolu a volných tukových kyselin. Vodou rozpustný glycerol je absorbován oběžním systémem a použit jako zdroj energie, zatímco nerozpustné volné tukové kyseliny jsou přeneseny do jater, kde jsou zpracovány jako každé jiné tukové kyseliny – včetně tukových kyselin z potravy. Proto je efekt trvalý a odstraněný tuk se zpět do tkáně nevrací.

13. Desinfekční efekt hydrodynamické kavitace [5]

Volba optimálního a ekologicky bezpečného technického procesu desinfekce přírodní vody, která obsahuje různé druhy patogenní flóry, začíná nabývat velkého významu pro světovou ekonomii. Dosud mezi populární metody desinfekce vody patří chemické metody a procedury, které jsou postaveny na využití především chlóru, peroxidu vodíku a jiných chemických látek a sloučenin. Nevýhodou těchto metod i přes jejich velkou účinnost (99,00-99,99%) je možná reaktivace mikroorganismů a také se do vody dostávají chlorové sloučeniny. Jedná se o sloučeniny, které mají mutagenní a karcinogenní působení a nesmíme opomenout, že použití chlóru a jiných výše zmíněných chemikálií je drahé. V této souvislosti se v poslední době výzkumy v oblasti vylepšování desinfekčního procesu ubírají cestou fyzikálních metod ošetřování vody. Metodou kavitačního ošetření je možné zajistit baktericidní účinek.

13.1. Ozdravení a desinfekce vody tryskami generujícími kavitaci [7]

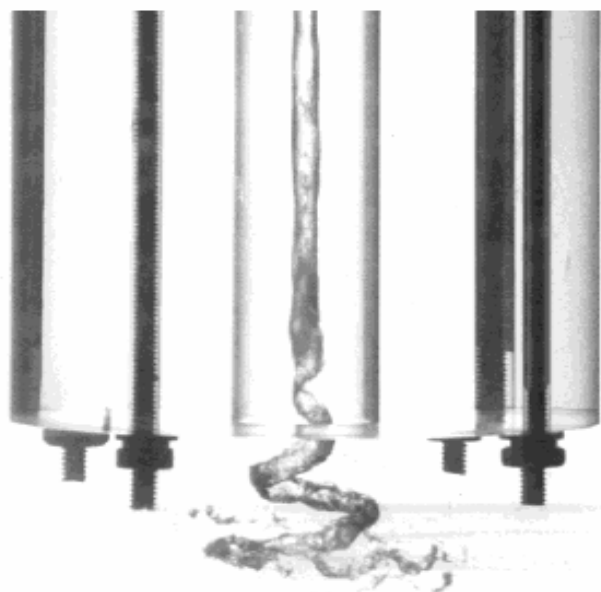
Ultrazvuková kavitace produkuje sonochemické reakce, které mají za následek velice efektivní okysličování hydroxylových radikálů. Obvykle je tento jev zajišťován použitím ultrazvukových trubic, které vysílají s velmi vysokou intenzitou akustický paprsek do roztoku, kde se následně tvoří kavitace, která destruktivně působí na mikroorganismy. Nicméně tato metoda má velmi omezenou efektivitu procesu, dosahuje projevu kavitace v tenké vrstvě a pouze v blízkosti povrchu trubice.

Avšak speciálně vyvinuté trysky DYNAJET® zajišťují vytváření kavitace v celé šíři kapaliny a to zajišťuje ovlivňování kapaliny tvorbou a zánikem kavitačních bublin. Odhaduje se, že tlak v ovlivněné oblasti při zániku kavitační bubliny dosahuje až 1.2×10^4 atmosfér při teplotě 10^4 K. Je tedy evidentní, že tento jev má velký potenciál při destrukci mikroorganismů v pitné vodě a dále snižuje potřebu používání chlóru pro čištění a desinfekci vody.

Několik nedávných studií prokázalo, že je možné zničit mikroorganismy v pitné vodě díky ultrazvukově generované kavitaci, obvykle ve spojení s mikročásticemi chlóru. Docházelo k značnému snížení potřeby chlóru pro desinfekci a počet mikroorganismů v pitné vodě dramaticky klesl, jelikož byly dlouze vystaveny působení kavitace, a to v celém objemu zkušební nádoby [9].

Za použití různých druhů trysek lze dosáhnout odlišných průběhů samotné kavitace. Tryska STRATOJET® generuje v kapalině pasivní akustickou rezonanci, která se projevuje turbulentní proudovou strukturou. Tento způsob zajišťuje vytváření mnohem více kavitačních bublin než nerezonanční trysky v ponorném čištění pitné vody. Trysku STRATOJET® můžeme vidět na obr.13.1.1, kde vytváří kavitaci prstencového tvaru (černá oblast).

Jiný tvar kavitace vytváří tryska DYNASWIRL®, která dosahuje kavitace pomocí vířivého toku (obr.13.1.2). Kavítace začíná uvnitř trysky a rozšiřuje se směrem od trysky v podobě liniového víru. Pokud kavítace dopadne na tvrdý povrch, kavitační bubliny zanikají za vzniku vysokých teplot a tlaku. Tato metoda přináší výhodu generování velkých kavitačních oblastí v prostoru.



Obr.13.1.1 Tryska STRATOJET® [7] . Obr. 13.1.2 Tryska DYNASWIRL® [7]

Kavítace generovaná tryskami DYNAJET® může výrazně zvýšit různé chemické reakce, okysličovat vodní sloučeniny a narušovat mikroorganismy obsažené ve vodě. Laboratorní zkoušky prokázaly schopnost těchto trysek destruktivně ovlivňovat mikroorganismy a oxidovat široké spektrum sloučenin včetně pesticidů, těkavých organických sloučenin arsenu, a snížení TOC (celkového organického uhlíku).

V porovnání s ultrazvukovými experimenty kavítace vyvolaná tryskami dosahuje oxidace s až o dva řády vyšší energetickou účinností než ultrazvuková metoda. Tato technologie představuje úspěšný pokus využít a použít destruktivní moc kavítace v lidský prospěch.



14. Závěr

Kavitace je pojmem obecně známým, avšak nepříliš prozkoumaným. Tato práce nám podává základní informace o problémech spojených s kavitačním projevem v tekutině, ale také ukazuje možné kladné využití kavitačního jevu v mnoha směrech lidského působení.

Přírodní a fyzikální jev kavitace bych již neřadil pouze do kategorie nežádoucích, protože je mnoho odvětví, ve kterých se jeví kavitace jako dobrý služebník. Lidstvu může být k pomoci, jestliže budeme vědět jak tohoto jevu využít, jak jej ovládnout ve svůj prospěch. V minulých letech byla kavitace spíše naším pánem, vytrvalým a neúprosným protivníkem. Dovoluji si podotknout, že tato vývojová etapa je již za námi a kavitace nám bude více sloužit nežli škodit.

Domnívám se, že výzkum kavitačního jevu je stále v začátcích a můžeme se jen zamyslet nad tím, co další léta výzkumu lidem přinesou. A jistě toho přinesou mnoho, lidstvo je zvědavé, prahnoucí po novém, ještě neobjeveném a neobjasněném a tím bezpochyby kavitace stále je.



Seznam použitých zdrojů

[1]

NOSKIEVIČ, Jaromír. Kavítace. 1. vyd. Praha: Academia Praha, 1969. 280s. ISBN 509-21-875

[2]

NÁDENÍČEK, Petr , MORNSTEIN, Vojtěch. Detekce kavitačního prahu v systémech modelující tělesné tekutiny. In X. ročník konference mladých lékařů. FN U svaté Anny v Brně : 2003. 2003, Brno.

[3]

SUPERKAVITACE, [online], Dostupné na World Wide Web:
<<http://herodes.feld.cvut.cz/nonlin/superkavitace/superkav.php>>.

[4]

WIKIPEDIE, Cavitation [online], Dostupné na World Wide Web:
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>>.

[5]

GASHCHIN , O. R., VITEN'KO, T. N. Journal of Water Chemistry and Technology : Features of disinfection kinetics of water containing Escherichia Coli in conditions of hydrodynamic cavitation. 1.1.October, 2008, vol. 30, no. 5, s. 567-575.WWW:<http://recources.metapress.com/pdfpreview.axd?code=w24841882l630753&size=largest>

[6]

PAZDERA, Josef. Ultrazvuk v genové léčbě. OSEL : Objective source E-learning [online]. 2006 [cit. 2006-09-08]. Dostupný z WWW:
<<http://www.osel.cz/index.php?clanek=2099>>.

[7]

KALUMUCK, K. M., CHAHINE, G. L. REMEDIATION AND DISINFECTION OF WATER USING JET GENERATED CAVITATION. Fifth International Symposium on Cavitation. November 1-4, 2003, vol. 5, no. 5, s. 1-8. Dostupný z WWW:
<http://www.dynaflowinc.com/Publication/pdf_documents/cav2003jetoxpaperfinal.pdf>.

[8]

TRIBOSON. Kavítace [online]. Dostupný z WWW:
<<http://www.triboson.com/kavitace.htm>>.



[9]

DEHGHANI, Mohammad Hadi, MAHVI, Amir Hossein, JAHED, Gholam Reza. Investigation and evaluation of ultrasound reactor for reduction of fungi from sewage. Journal of Zhejiang University Science [online]. 2007, vol. 8, no. 7 [cit. 2007-03-05], s. 493-497. Dostupný z WWW: <<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1906595>>. ISSN B0493.

[10]

WIKIPEDIA, Otevřená encyklopedie. Kavítace [online]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kavítace>>.

[11]

TDS Brno-SMS s.r.o. Vodní turbíny. Vodní turbíny [online]. 2007, 1, [cit. 2007-04-02]. Dostupný z WWW: <www.tdsbrnosms.cz/dokumenty/technicke.../vodni-turbiny.doc>.

[12]

WIKIPEDIA, Otevřená encyklopedie. Vodní turbíny [online]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vodni_turbiny>.

[13]

ZBOŘIL, Josef. Obnovitelné a alternativní zdroje energie [online]. Ostrava : Vysoká škola Báňská, 2005. 146 s. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava. Dostupné z WWW: <<http://www.zboriljosef.cz/files/Obnovitelne%20zdroje%20energie.pdf>>.

[14]

NECHLEBA, Miroslav. Hydraulické stroje. první. Brno : Vysoké učení v Brně, 1960. 128 s.

[15]

Abeceda malých vodních turbín [online]. 2010 [cit. 2010-05-16]. Savka turbíny. Dostupné z WWW: <<http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/savky-francis.htm>>.



Seznam použitých veličin

Název veličiny	Symbol	Jednotky
Reynoldsovo číslo	Re	-
Tahová pevnost vody	σ	$N.m^{-2}$
Velikost kavitačního jádra	Ro	mm
Výška savky	Hs	m
Napětí vodních par	p''	Pa
Hustota	ρ	$Kg.m^{-3}$
Gravitační zrychlení	g	$m.s^{-2}$
Thomův kavitační součinitel	σ_t	-
Tlak před rychlostním profilem	P_∞	Pa
Rychlost před rychlostním profilem	v_∞	$m.s^{-1}$
Tlak nasycených par	P_{np}	Pa
Průtok čerpadla	Q	$m^3.s^{-1}$
Pracovní výška čerpadla	H	m
Ponor lodního šroubu	h	m
Průměr lodního šroubu	D	m